



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## TESI DE MASTER

**Máster**

**INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y LA CONSTRUCCIÓN**

**Título**

**ESTUDIO DE MORTEROS CON ÁRIDO RECICLADO  
DE HORMIGÓN**

**Autor**

**MARIANA JAMAICA CASTRO**

**Tutor**

**Dra. MARILDA BARRA BIZNOTTO**

**Dra. SUSANNA VALLS**

**Intensificación**

**Fecha**

**OCTUBRE - 2011**



## AGRADECIMIENTOS

Primeramente me gustaría agradecer a mis tutoras, Marilda Barra y Susanna Vals, por haberme permitido estar en su grupo de investigación teniendo siempre la mejor disposición para resolver cualquier duda, apoyarme en todo momento en todo lo que fue necesario para la realización de este trabajo, gracias por haber confiado en mi.

A mis padres por haberme dado esta oportunidad, por haber confiado en mi, por haberme apoyado siempre en todas mis decisiones y que gracias a su ejemplo y esfuerzo, hoy en día soy lo que soy .

A mi hermana Laura, que en todos los momentos de mi vida a estado apoyandome, gracias por estar siempre a mi lado.

A mis madrinas, July y Maria Elena por demostrarme su cariño y amor, y estar siempre al pendiente de mi.

A las personas que he conocido a lo largo de este trabajo, gracias por su compañía y apoyo, especialmente a Cristian, Andrea, Alexandra y Gustavo.

A mis amigos de Celaya que a pesar de la distancia me han demostrado su afecto y cariño, y a mis amigos de Barcelona por formar parte de esta experiencia inolvidable.

Y finalmente a Dios, por darme la familia que me dio, por llenarme de gracias y bendiciones, por que nunca se aparto de mi.

## RESUMEN

El problema de la contaminación del medio ambiente, es un tema que se debe abordar, debido a que cada vez mas, la actividad del ser humano causa grandes problemas irreversibles a nuestro planeta, causando un impacto ambiental que afecta tanto al suelo, al aire y al agua.

El sector de la construcción es uno de los principales contaminantes, debido a la enorme cantidad de residuos que genera, trayendo como consecuencias emisiones de CO<sub>2</sub>, y sustancias contaminantes para nuestro planeta. Otro problema que genera la construcción es la extracción ilimitada de las materias primas no renovables, las cuales se utilizan para la fabricación de los materiales de construcción.

Debido a esto, es necesario fomentar el reciclaje de aquellos residuos que genera la construcción. Varios países como Dinamarca, Holanda, Brazil, Japón reciclan gran porcentaje de sus residuos, y otros como España siguen vertiendo la mayoría de sus residuos a vertederos.

Hay varios residuos cuyas propiedades han sido estudiadas para ver la influencia que tienen estos en los materiales cuando se reutilizan como materias primas, sin embargo, hay otros que no, tal es el caso del árido reciclado fino, cuyos residuos se siguen depositando en vertederos.

Este trabajo trata de encontrar una aplicación para el árido reciclado fino proveniente de hormigón, cuyo tamaño de partícula es  $<4\text{mm}$ .

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo consiste en fabricar morteros de albañilería con diferentes sustituciones de árido fino reciclado, para encontrar el limite de contenido de árido reciclado que los morteros de albañilería pueden permitir sin que sus propiedades mecánicas se vean afectadas.

Primeramente se hizo un estudio de los áridos que se utilizaron, es decir, se analizaron las propiedades de los áridos reciclados y de los áridos convencionales tales como su granulometría, densidad, absorción de agua, composición química y mineralógica.

Posteriormente se fabricaron los morteros patrón o morteros de referencia, es decir, morteros con un contenido de áridos convencionales del 100%, se analizaron sus propiedades como su consistencia, densidad aparente en estado fresco, contenido de aire, retención de agua, coeficiente de absorción de agua y resistencias mecánicas.

Una vez obtenido las propiedades de los morteros patrón, se fabricaron los morteros reciclados con diferentes tipos de sustitución, así, analizando las propiedades de cada uno de ellos, y comparandolas con nuestras propiedades de referencia, sabremos el limite del porcentaje de áridos reciclados, que se puede añadir a los morteros de albañilería sin que estos se vean afectados en sus propiedades.

**Palabras clave:** Arido reciclado, morteros, propiedades.

## ABSTRACT

The environment contamination problem is a subject that must be addresses because human activity is causing problems to our planet increasingly, which causes an environmental impact that affects soil, air and water.

The construction sector is one of the main contaminants due to the gigantic amount of residue that generates, which translate into CO<sub>2</sub> emissions and contaminant substances for our planet. The other problem generated by construction is the unlimited extraction of nonrenewable raw material, which are used to fabricate construction materials.

Because of these issues it's necessary to foment the recycling of those residues that the construction activity generates. Several countries like Denmark, the Netherlands, Brazil and Japan recycle a great amount of their residues and others like Spain keep on pouring their residues into dumpers.

There are some residues whose properties have been studied to see the influence they have on the materials when these are reused as raw materials. However it's not the case of the fine recycled aggregate, whose residues are still poured into dumpers.

This essay tries to find an application to this fine recycled aggregate from concrete, whose particle size is less than 4mm

Therefore the essay's goal is to produce masonry mortars with different fine recycled aggregate replacements. This will allow us to find the recycled aggregate content limit that masonry mortars can admit without affecting their mechanical properties.

Firstly, a study of the arid used was made: the properties of the recycled and the conventional aggregate were analyzed, such as their granulometry, density, water absorption, chemical composition and mineralogy.

Later, the reference mortar was produced, that is to say, mortars with a conventional aggregate content of 100%. Their properties were analyzed like their consistency, bulk density in fresh, air content, water retention, water absorption coefficient and mechanical resistance.

Once the properties of the reference mortars were obtained, the recycled mortars with different types of replacements were made. Analyzing the properties of each and comparing them to the reference properties we will be able to know the percentage limit of recycled aggregates that can be added to masonry mortars without altering their mechanical properties.

**Key words:** Recycled aggregated, mortars, properties.

## Capítulo 1

1.Objetivos .....	1
-------------------	---

## Capítulo 2

2. Introducción .....	2
-----------------------	---

## Capítulo 3

<b>3. Estado del arte .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1 Áridos reciclados .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1.1 Definición áridos reciclados .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1.2 Clasificación de los áridos reciclados .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1.3 Propiedades de los áridos reciclados.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1.4 Propiedades físicas .....</b>	<b>5</b>
3.1.4.1 Granulometría .....	5
3.1.4.2 Densidad .....	6
3.1.4.3 Absorción .....	6
3.1.4.4 Forma y textura superficial .....	7
3.1.4.5 Coeficiente de los ángeles .....	8
<b>3.1.5 Propiedades químicas.....</b>	<b>8</b>
3.1.5.1 Resistencia a las heladas .....	8
3.1.5.2 Contaminantes e impurezas .....	9
3.1.5.3 Contenido de cloruros .....	9
3.1.5.4 Contenido de sulfatos .....	10
3.1.5.5 Reacción alcali-áridos .....	10
<b>3.1.6 Producción del árido reciclado .....</b>	<b>10</b>
3.1.6.1 Etapa del procesamiento.....	10
3.1.6.2 Demolición selectiva .....	11
3.1.6.3 Plantas de producción .....	11
3.1.6.4 Sistemas de trituración y cribado .....	12
3.1.6.5 Eliminación de impurezas .....	13
3.1.6.6 Almacenamiento .....	13
<b>3.1.7 Normativa de los áridos .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Morteros .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2.1 Definición .....</b>	<b>14</b>

<b>3.2.2 Introducción a los morteros</b>	14
<b>3.2.3 Clasificación de los morteros</b>	14
<b>3.2.4 Morteros de albañilería</b>	15
3.2.4.1 Definición	15
3.2.4.2 Clasificación de los morteros de albañilería	15
<b>3.2.5 Componentes de los morteros</b>	16
3.2.5.1 Conglomerantes	16
3.2.5.1.1 Cales	16
3.2.5.1.2 Cementos	16
3.2.5.2 Aridos	17
3.2.5.3 Aditivos	18
3.2.5.4 Adiciones	19
3.2.5.5 Agua	19
<b>3.2.6 Propiedades de los morteros</b>	19
<b>3.2.6.1 Propiedades de los morteros en estado fresco</b>	19
3.2.6.1.1 Consistencia	19
3.2.6.1.2 Tiempo de utilización	20
3.2.6.1.3 Densidad aparente	20
3.2.6.1.4 Adherencia	20
3.2.6.1.5 Contenido de iones cloruro	21
3.2.6.1.6 Capacidad de retención de agua	21
3.2.6.1.7 Contenido de aire	21
<b>3.2.6.2 Propiedades de los morteros en estado endurecido</b>	21
3.2.6.2.1 Resistencia mecánica	21
3.2.6.2.2 Adherencia	22
3.2.6.2.3 Retracción	23
3.2.6.2.4 Absorción de agua	23
3.2.6.2.5 Densidad	23
3.2.6.2.6 Permeabilidad al vapor de agua	24
3.2.6.2.7 Comportamiento térmico	24
3.2.6.2.8 Comportamiento al fuego	24
<b>3.2.7 Normativa de los morteros</b>	25
<b>3.2.8 Marcado CE en los morteros de albañilería</b>	26
<b>3.2.9 Trabajos publicados acerca del uso de árido reciclado en morteros</b>	29

## Capítulo 4

<b>4. Metodología</b>	30
<b>4.1 Introducción</b>	30
<b>4.2 Caracterización de los materiales</b>	30
4.2.1 Granulometría	30
4.2.2 Composición mineralógica	30

4.2.3 Composición química elemental	31
4.2.4 Densidad y absorción	31
<b>4.3 Estudio de morteros</b>	<b>32</b>
<b>4.3.1 Dosificación y designación de morteros</b>	<b>32</b>
4.3.1.1 Tipos de mortero sin cal	32
4.3.1.2 Tipos de mortero con cal	32
<b>4.3.2 Fabricación de los morteros</b>	<b>33</b>
<b>4.3.3 Propiedades de los morteros</b>	<b>33</b>
<b>4.3.1 Propiedades de los morteros en estado fresco</b>	<b>33</b>
4.3.1.1 Consistencia	33
4.3.1.2 Densidad aparente del mortero fresco	34
4.3.1.3 Contenido de aire	35
4.3.1.4 Capacidad de retención de agua	35
<b>4.3.2 Propiedades de los morteros en estado endurecido</b>	<b>36</b>
4.3.2.1 Densidad aparente en seco	36
4.3.2.2 Resistencia a flexión y compresión	37

## Capítulo 5

<b>5. Resultados y discusión</b>	<b>38</b>
<b>5.1 Caracterización de materiales</b>	<b>38</b>
<b>5.1.1 Conglomerantes</b>	<b>38</b>
5.1.1.1 Cemento	38
5.1.1.2 Cal	39
<b>5.1.2 Aridos</b>	<b>39</b>
5.1.2.1 Granulometría	39
5.1.2.2 Densidad y absorción	42
5.1.2.3 Difracción de Rayos X	43
5.1.2.4 Fluorescencia de Rayos X	45
<b>5.1.3 Morteros comerciales</b>	<b>45</b>
5.1.3.1 Granulometría	45
5.1.3.2 Difracción de Rayos X	48
5.1.3.2 Fluorescencia de Rayos X	50
<b>5.2 Estudio de morteros</b>	<b>52</b>
<b>5.2.1 Dosificación de morteros</b>	<b>52</b>
5.2.1.1 Dosificación de morteros sin cal	53
5.2.1.2 Dosificación de morteros con cal	56
<b>5.2.2 Propiedades de los morteros en estado fresco</b>	<b>56</b>
5.2.2.1 Consistencia	56
5.2.2.2 Densidad aparente	58
5.2.2.3 Contenido de aire	60
5.2.2.4 Capacidad de retención de agua	63



<b>5.2.3 Propiedades del mortero en estado endurecido</b>	66
5.2.3.1 Densidad en seco y porosidad	66
5.2.3.2 Resistencia mecánica	68

## Capítulo 6

<b>6. Conclusiones</b>	71
------------------------	----

## Capítulo 7

<b>7. Trabajo a futuro</b>	75
----------------------------	----

## Capítulo 8

<b>8. Bibliografía</b>	76
------------------------	----



# 1. OBJETIVOS

## Objetivo general

- Diseñar un mortero de albañilería con áridos finos reciclados provenientes de escombros de hormigón.

## Objetivos específicos

- Estudiar las propiedades de los áridos finos reciclados que se utilizarán en la fabricación de los morteros de albañilería para compararlas con las propiedades de los áridos finos convencionales, y así tener una referencia de como estos pueden afectar a las propiedades de los morteros.
- Evaluar las propiedades que presentan los morteros con áridos convencionales con cal y sin cal, así como las propiedades de los morteros con diferente porcentaje de contenido de áridos finos reciclados.
- Una vez obtenido el valor de las propiedades, tanto de los morteros de referencia como de los morteros reciclados, encontrar el porcentaje límite de contenido de áridos reciclados finos en morteros de albañilería, para obtener morteros reciclados con propiedades semejantes a las de los morteros convencionales.

## 2. INTRODUCCION

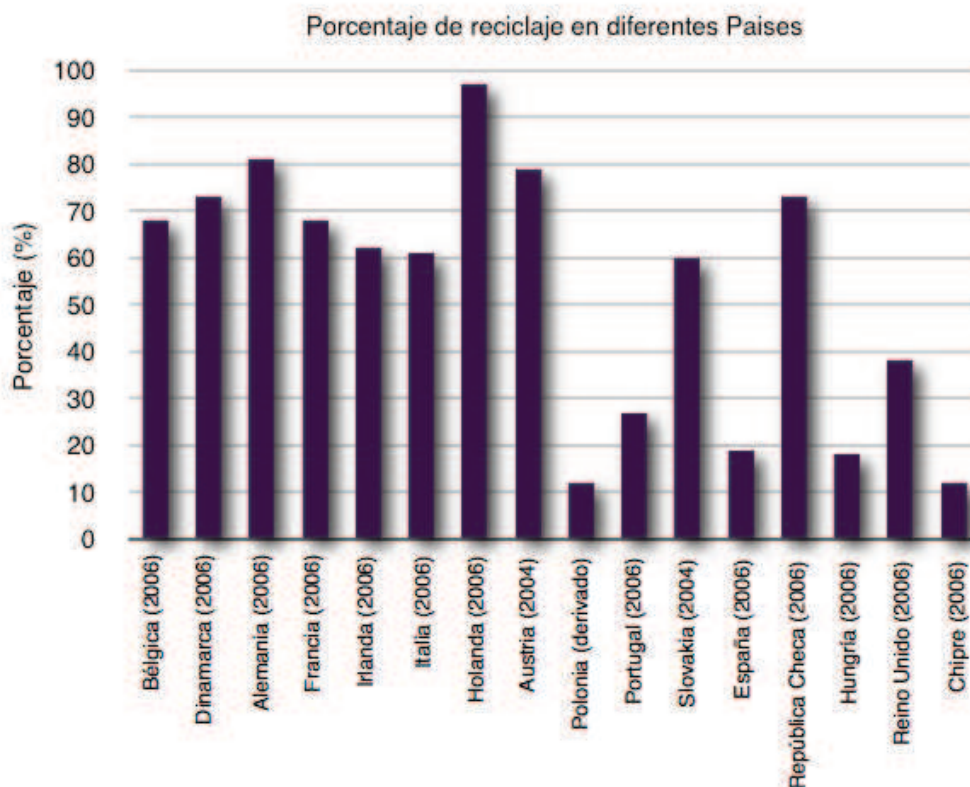
La industria de la construcción y demolición es el sector más importante a considerar en cuanto a la problemática de la contaminación, debido a la enorme cantidad de residuos que genera, siendo responsable de la producción de entre 450 kg y 1000 kg de residuos por habitante y año aproximadamente (2).

Así pues, surge una gran necesidad de reciclar los materiales de las demoliciones de construcción debido al gran impacto ambiental que ocasiona el agotamiento de los recursos no renovables por la extracción ilimitada de las materias primas necesarias para crear los nuevos materiales, la gran cantidad de emisiones contaminantes que afectan tanto al aire, suelo y agua, así como la escasez de espacios para verter los escombros y su elevado coste.

Para minimizar estos riesgos es necesario tener un control exhaustivo del consumo de los recursos y una correcta gestión de los residuos que se generan a lo largo del proceso constructivo y su demolición.

En muchos países se lleva a cabo el reciclaje de sus residuos de construcción, especialmente en Holanda, en donde el porcentaje de reciclaje está por encima del 90%, otros países como Dinamarca, Alemania, Austria y República Checa reciclan más del 70%, en España este porcentaje se encuentra apenas entre un 18%.

La *gráfica 1* nos muestra una clara comparación acerca de la gestión de los residuos de construcción en diferentes países (18).



**Gráfica: 1:** Gestión de residuos de construcción y demolición en Europa

Dentro de los residuos que genera el sector de la construcción, podemos encontrar varios tipos, en la *tabla 1* se muestra una relación de cada uno con su respectivo porcentaje de producción: (2)

Tipo de residuo	Porcentaje	Tipo de residuo	Porcentaje
Cerámicos	54%	Plástico	1,5%
Hormigón	12%	Metales	2,5%
Piedra	5%	Asfalto	5%
Arena, grava y áridos	4%	Yeso	0,2%
Madera	4%	Papel	0,3%
Vidrio	0,5%	Basura	7%

**Tabla 1:** Clasificación de los residuos generados por la construcción

Entre los principales residuos que se reutilizan son los cerámicos, hormigón, áridos, plástico y metales.

El objeto de estudio de este trabajo serán los áridos reciclados, ya que serán la materia prima para la fabricación de los morteros de albañilería que se van a fabricar.

Los áridos reciclados pueden clasificarse en 2 tipos según su tamaño; la primera clase de áridos reciclados son los áridos finos cuyo tamaño máximo de partícula es de 4mm, el segundo tipo son los áridos grueso los cuales tienen un tamaño mínimo de 4mm.

El estudio de la utilización de los áridos reciclados se ha enfocado en los áridos gruesos, para los cuales se han encontrado varias aplicaciones como es el caso del hormigón estructural, dejando a un lado los áridos finos los cuales según algunos estudios (5) estos que comprenden entre un 20% y 50% de los residuos de construcción, siguen siendo depositados en los vertederos.

Este trabajo se basa en la utilización del árido fino reciclado proveniente de hormigón para la fabricación de morteros de albañilería. Primeramente se estudiarán las propiedades que este tipo de áridos presentan para posteriormente compararlas con las propiedades de los áridos convencionales.

Se fabricarán morteros patrón, es decir, morteros con un contenido del 100% áridos convencionales, para obtener las propiedades que estos morteros presentan, posteriormente a esto se fabricarán los morteros con diferentes tipos de contenido de áridos reciclado y una vez obtenidas las propiedades de los morteros reciclados, se hará un análisis para determinar que porcentaje de contenido de árido reciclado pueden tener los morteros de albañilería sin que estos se vean afectados en sus propiedades.

## 3. ESTADO DEL ARTE

### 3.1. ARIDOS RECICLADOS

#### 3.1.1 Definición árido reciclado

Árido resultante del procesamiento de materiales inorgánicos utilizados previamente en la construcción.

#### 3.1.2 Clasificación de los áridos reciclados

Los áridos reciclados se pueden clasificar en 3 grupos dependiendo de su naturaleza (2):

1. Áridos reciclados cerámicos: Árido que se obtiene por procesamiento de material predominantemente cerámico. El 85% de este árido debe tener una densidad seca superior a  $1600 \text{ kg/m}^3$  según la norma holandesa, esto para evitar materiales excesivamente porosos y ligeros.
2. Áridos reciclados mixtos: La norma holandesa los define como aquellos áridos que deben contener un porcentaje mayor del 50% de hormigón con una densidad seca superior a  $2100 \text{ kg/m}^3$  y no mas del 50% de materiales pétreos reciclados de distinta naturaleza que el hormigón, incluyendo los cerámicos con una densidad seca mayor de  $1600 \text{ kg/m}^3$ .
3. Áridos reciclados de Hormigón: Son aquellos áridos que se obtienen por el procesamiento de materiales provenientes de residuos de hormigón de cemento Portland y áridos naturales, machacados, cribados y procesados en plantas de reciclados.

Dentro de los áridos reciclados provenientes de hormigón se pueden distinguir dos tipos (2):

- Áridos Gruesos

El tamaño de partícula de este tipo de áridos debe ser  $> 4 \text{ mm}$ , este puede ser usado para la fabricación de hormigones tanto no estructural como estructural, en el anejo 15 de la EHE-08, encontramos las recomendaciones para la utilización de este tipo de áridos en hormigones reciclados.

Una de las principales recomendaciones que nos dice la EHE-08 es limitar el contenido de árido grueso reciclado al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso, ya que con esta limitación las propiedades del hormigón reciclado se asemejan demasiado a las del hormigón convencional.

- Áridos finos

El tamaño del árido debe ser  $< 4\text{mm}$ , como se había comentado anteriormente su uso aun esta limitado y en proceso de investigación, debido a que a menor tamaño de los áridos, mayor es el contenido del mortero adherido y esto presenta varios inconvenientes en la calidad del árido, y por consiguiente afecta a las propiedades del material que se quiere fabricar, en este caso a los morteros de albañilería, ya que demanda una mayor cantidad de agua debido a su elevada absorción y esto reduce la resistencia.

### 3.1.3 Propiedades de los áridos reciclados

Las propiedades de los áridos reciclados dependen de los siguientes factores(2,3):

- De las características de los materiales de los que proceden.
- De las características de los equipos de machaqueo utilizados en su producción.
- De la naturaleza de los cribados que se hayan realizado.
- De los procedimientos empleados para eliminar sus impurezas

Una de las mas grandes diferencias que hay entre los áridos reciclados y los áridos naturales es que los primeros contienen un alto contenido de mortero adherido a la superficie del mismo, y este es el principal problema que hace que mucha de las propiedades de los áridos reciclados se vean afectadas, como una mayor absorción, menor densidad, mayor coeficiente de los ángulos, mayor contenido de sulfatos, etc,

Esto a su vez afectan el modulo de elasticidad, retracción, fluencia y problemas asociados con durabilidad.

Las propiedades de los áridos reciclados se clasifican en dos grupos, las propiedades físicas y las propiedades químicas.

### 3.1.4 Propiedades Físicas

#### 3.1.4.1 Granulometría

La granulometría de los áridos consiste en separar el árido en diferentes tamaños de partículas, para así encontrar el porcentaje que hay dentro del árido de los diferentes tamaños.

La granulometría de los áridos es un parámetro muy importante para la dosificación de hormigones y morteros ya que al constituir su esqueleto tiene una gran influencia en sus propiedades.

Es posible variar la granulometría en los áridos, ya que dependiendo de la abertura de la trituradora, podremos obtener diferentes tamaños de partículas, otro factor que puede influir en esta propiedad es la calidad del hormigón original, presentando módulos

granulométricos ligeramente superiores los áridos provenientes de hormigones de mayor resistencia que los de menor resistencia a igual sistema de trituración.(2,3).

La cantidad de áridos gruesos que se generan al machacarse, se encuentra entre un 70% y 90% del árido reciclado total producido, este porcentaje varia según la composición del hormigón original (2)

Con respecto a la fracción fina producida del árido reciclado, esta tiene mayor presencia en peso, debido a la aparición de pequeñas partículas de mortero que se desprenden en el proceso. Según algunos estudios (2), la generación de finos sobre fracción gruesas ya clasificadas puede variar entre 0,27% y 1,14%.

La misma investigación antes mencionada expone que las recomendaciones y exigencias en las granulometrías de los áridos reciclados no difieren en comparación de los áridos naturales.

#### 3.1.4.2 Densidad

La densidad del árido reciclado es inferior al del árido natural debido a la pasta de cemento adherido a los granos, oscilando entre 2.100-2.400 kg/cm<sup>3</sup>, mientras que la densidad saturada en superficie seca del árido natural varía entre 2,300-2.500 kg/cm<sup>3</sup>. (3)

Existen varios factores que influyen en la densidad del árido reciclado los cuales se describen a continuación: (2)

- Tamaño del árido reciclado: La densidad de árido reciclado es ligeramente superior en las fracciones más gruesas que en las finas, es decir, que la densidad crece con el tamaño máximo del árido.
- Técnicas de procesamiento: Según la trituradora que se utilice, la densidad del árido puede variar. Por ejemplo cuando se utiliza una trituradora de impacto, esta elimina la mayoría del mortero adherido en el árido, con lo cual se obtiene una mayor densidad, se han realizado estudios (6) en los cuales se han hecho varias etapas de trituración con diferentes sistemas (trituradora de impacto y de rodillo), y se ha alcanzado valores de densidad del 98% con respecto al del árido natural, por lo consiguiente se obtienen áridos de mayor calidad.
- Calidad del hormigón de origen: Al ser mayor la resistencia del hormigón del que proceden los áridos reciclados, mayor será la densidad que de obtendrá.

#### 3.1.4.3 Absorción

Unos de los principales problemas que se presentan al utilizar los áridos reciclados es que estos presentan una alta absorción de agua a diferencia de los áridos convencionales, alcanzando valores que oscilan entre un 16-17%, mientras que para los áridos convencionales presentan valores de entre 0-4% (2). Esta gran diferencia es debido a la pasta de mortero adherida en las partículas de los áridos reciclados

Este factor influye mucho en las propiedades del material para el cual serán destinados los áridos reciclados, ya que debido a su alta absorción, este demandará una mayor cantidad de agua, lo cual se traduce a una menor resistencia

Algunos factores que influyen en la absorción del árido reciclado son los siguientes:

(2)

- Tamaño del árido reciclado: Debido a que mientras mas pequeño sea el árido mas cantidad de mortero adherida tendrá, también será mayor la absorción de agua que estos presenten.
- Técnicas de procesamiento: Este factor influye mucho en la calidad los áridos reciclados ya que al emplear diferentes técnicas de procesamiento o aumentar el numero de veces que se trituran, los áridos quedaran con mas o menos cantidad de mortero adherida, mejorando la calidad cuando se utilizan las trituradoras de impacto o mandíbula, y aumentando el numero de trituraciones.
- Calidad del hormigón de origen: Mientras mejor sea la calidad del hormigón de origen de los áridos reciclados, menor será la absorción de agua que estos presenten.

#### 3.1.4.4 Forma y textura superficial

Debido a la presencia de mortero adherida en los áridos reciclados, estos presentan un coeficiente de forma mayor que los áridos naturales, es decir, que la forma de las partículas en los áridos reciclados tiende a ser mas redonda.

En cuanto al ensayo de índice de lajas, los áridos reciclados presentan valores mas reducidos que los áridos naturales, esto también se puede decir que es debido a que la pasta de mortero que queda adherido en las caras planas que presentan las partículas tiende a aumentar el espesor de las partículas con forma de laja, reduciendo así el índice de lajas. El porcentaje de índice de lajas para los áridos reciclados se encuentra entre el 7-9% cumpliendo con las especificaciones que marca la EHE que impone un limite del 35%. (2,3).

La forma de los áridos influye en gran medida en la trabajabilidad y en las resistencias mecánicas. Cuando se utilizan áridos redondos se obtienen mezclas mas dóciles y de mucho mas alta resistencia.

En el caso de los áridos machacados, se consigue menos trabajabilidad , pero mayor resistencias a flexotracción. Esto se debe a la mayor superficie especifica que presentan con respecto a los áridos redondos, con lo cual la adherencia es mas elevada.

La forma de las partículas del árido fino afecta sobre todo, al volumen de agua necesario para alcanzar la consistencia deseada.

La textura superficial del árido afecta a la unión de este con la pasta de cemento e influye también, en la demanda del agua de la mezcla, especialmente en el caso del árido fino.



La textura y la forma de un árido tienen gran influencia en las resistencias, repercutiendo mas en las resistencias a flexotracción que en la de compresión. Este efecto se debe a que cuanto más rugoso es un árido, mayor superficie de contacto tiene con la pasta del cemento y, por consiguiente, mayor adherencia presentara con ella.

#### 3.1.4.5 Coeficiente de los ángeles

El coeficiente de desgaste de los ángeles es la diferencia entre la masa original de un árido y su masa tras ser sometido a una carga abrasiva y rechazando el material que pasa por el tamiz 1,6 UNE, expresada en tanto por ciento de masa inicial. Por lo tanto mientras mejor resistencia al desgaste tenga un árido, menor será su coeficiente de los ángeles.

Los áridos reciclados tienen un elevado coeficiente de los ángeles debido a la grande cantidad de mortero que se desprende al hacer el ensayo, siendo los mas afectados los áridos finos, que como se ha comentado anteriormente son estos los que tienen mayor cantidad de mortero adherida a su superficie

Los factores que influyen en el coeficiente de los ángeles son los antes comentados en la absorción y en la densidad, el tamaño de la fracción, el procesamiento empleado y la resistencia del hormigón de origen.

Mientras menor sea la relación agua/cemento del hormigón de origen, menor será el coeficiente de los ángeles de los áridos que provengan de el.

La EHE establece un coeficiente máximo de 40% para su aplicación en hormigón estructural. El valor esperable del coeficiente de los ángeles para los áridos reciclados puede situarse en un rango muy amplio de 25-42%. (3)

### 3.1.5 Propiedades químicas

#### 3.1.5.1 Resistencia a las heladas

Existe un ensayo el cual nos permite saber la resistencia a las heladas que tienen los áridos, el cual consiste en medir la variación de volumen que sufren los áridos al ser expuestos a ciclos de hielo y deshielo, por cambios térmicos de temperatura superiores a 0°C, o por cambios de humedad.

Muchos estudios consultados (3) presentan valores de resistencias a las heladas de los áridos reciclados que no cumplen con las normativas que se emplean para los áridos convencionales para su utilización en hormigón, sin embargo en estudios que se han realizado en áridos que provienen de pavimentos de hormigón, es decir, de mejor calidad, se obtienen valores mas optimistas, por lo tanto los hormigones que tienen mayor resistencia, producen áridos reciclados con mayor resistencia a las heladas,

Los factores que influyen en esta propiedad, son la calidad del hormigón del que provienen los áridos, el proceso de trituración y el tamaño del árido.

La EHE (8) especifica una perdida máxima de volumen del 18% para la utilización de los áridos gruesos convencionales en hormigones, mientras que los valores obtenidos



en estudios consultados (3) de los áridos reciclados oscilan entre 23-32%, con un único proceso de trituración, pudiendo reducir esta valor hasta un 6-10% con dos procesos de trituración sucesivos.

### 3.1.5.2 Contaminantes y impurezas

Los áridos reciclados cuentan con muchos contaminantes que afectan la calidad del mismo, como tal es el caso de la madera, vidrio, yeso, plástico, arcilla, materia orgánica, etc. Esto hace que los materiales que se formaran a partir de este tipo de áridos tengan una menor resistencia. Dependiendo del tipo de impureza que se presente afectara de distintas maneras (1,2,3):

- El vidrio ayuda a la reacción álcali-árido, y debido a que su densidad es similar a la de los áridos reciclados, la separación suele ser difícil.
- El yeso favorece el ataque por sulfatos.
- La madera y el papel son inestables a los ciclos de humedad y sequedad y a los ciclos de hielo y deshielo lo que produce desconchados superficiales.
- Pinturas ocuyen aire en el hormigón
- La arcilla demanda mas agua, con lo cual se presentan las retracciones.
- Los metales debido a la oxidación que sufren causan manchas superficiales.

Los áridos que presentan menos contaminantes e impurezas son los áridos reciclados provenientes de hormigón.

En la "Guide for specification of recycled aggregates for concrete production" de Australia se establecen unas recomendaciones para el uso de los áridos reciclados en los cuales dice que el contenido máximo de impurezas no debe superar el 2%.

### 3.1.5.3 Contenido de Cloruros

Los áridos reciclados presentan una gran cantidad de cloruros, esto varia según el hormigón de origen, por ejemplo, en hormigones procedentes de obras marítimas, puentes, pavimentos expuestos sales para el deshielo y hormigones con aditivos acelerantes la cantidad de cloruros suele ser mucho mas elevada. (3).

Debido a que los cloruros son los que inician el proceso de corrosión de las armaduras, es necesario reducirlos, y esto se reduce notablemente al contabilizar los cloruros totales que tienen los áridos reciclados. De echo para los áridos naturales basta con contabilizar los áridos solubles en agua, ya que son estos los causantes de la corrosión, pero para el caso de los reciclados debido al contenido de cemento adherido puede ser que algunos cloruros se combinen causando corrosiones, es por eso que en este caso se contabilizaran los cloruros totales.

#### 3.1.5.4 Contenido de sulfatos

Los áridos reciclados presentan un mayor contenido de sulfatos que los áridos naturales, esto se debe principalmente al contenido de mortero adherido y a la cantidad de yeso que muchos áridos reciclados contienen. Los resultados del elevado contenido de sulfatos nos traerá como consecuencia problemas de carbonatación y expansión en la nueva mezcla. Por lo tanto es necesario establecer unos límites del contenido de compuestos totales de azufre, así como reducir al máximo la cantidad de yeso que los áridos reciclados pueden contener y disminuir el porcentaje de utilización de los áridos finos ya que estos al contener mayor cantidad de mortero, también son más susceptibles a contener impurezas.

La norma holandesa y la Rilem (4) recomiendan un máximo del 1% de contenido de sulfatos en los áridos reciclados.

#### 3.1.5.5 Reacción Alkali-áridos

Debido a la gran cantidad de alcalinos que tienen los áridos reciclados por su mortero adherido, estos al estar en un ambiente húmedo, causan reacciones álcali-áridos que traen como consecuencias la producción de un compuesto gelatinoso que generara expansiones.

Para minimizar este riesgo, es recomendable utilizar cementos con adiciones (cenizas volantes o escorias granuladas) ya que estas adiciones hacen impermeables al hormigón y así se pueden evitar este tipo de reacciones.

Generalmente este contenido de álcalis totales, con un porcentaje de óxido de sodio equivalente, está comprendido entre el 1-2%. (3)

### 3.1.6 Producción del árido reciclado

#### 3.1.6.1 Etapa del procesamiento: (3)

Para la obtención de los áridos reciclados es necesario que el residuo se procese, para esto se diferencian 2 fases:

1. Demolición selectiva en origen: Desde el inicio de la demolición se debe tener un cuidado especial para que otros residuos indeseables que pueden afectar la calidad de los residuos provenientes de hormigón no se mezclen. Para esto es necesario separar los residuos cerámicos de los de hormigón, de esta forma se pueden reducir tratamientos posteriores. También es importante el método de demolición que se va utilizar ya que es necesario reducir su tamaño in situ debido a que las máquinas de trituración de las plantas de reciclaje admiten un tamaño máximo de 1200 mm en plantas fijas y de 400-700 mm para plantas móviles

2. Transformación de los escombros de hormigón en áridos: La diferencia que hace una planta de procesamiento de áridos naturales a una de áridos reciclados, es que la de áridos reciclados cuenta con unos electroimanes para la separación de acero y otros sistemas de eliminación de impurezas.

#### 3.1.6.2 Demolición selectiva

Como se ha comentado anteriormente es necesario hacer una demolición selectiva para evitar que algunos materiales no deseados se mezclen con los áridos reciclados, esto nos ayudara a minimizar costes ya que se necesitaran menos tratamientos para procesar los áridos reciclados y también se reducen costos tanto en transporte de material como en vertederos.

Para la demolición selectiva es necesario tomar en cuenta los siguientes pasos:

1. Sacar los desechos y las molduras no fijas
2. Desmantelar los elementos no fijos como puertas, ventanas, tejados, instalaciones de agua, electricidad y calefacción.
3. Demolición de la estructura.

Una vez que la demolición selectiva ha concluido, los residuos se lleva a las plantas de áridos reciclados donde son clasificados y triturados.

#### 3.1.6.3 Plantas de producción

Las plantas de producción se pueden clasificar en:

- Plantas de primera generación: Carecen de mecanismos de eliminación de contaminantes, a excepción del acero y otros elementos mecánicos.
- Plantas de segunda generación: Añade al tipo anterior sistemas mecánicos o manuales de eliminación de contaminantes previos al machaqueo, elementos de limpieza y clasificación del producto machacado, por vía seca o húmeda.
- Plantas de tercera generación: Dirigidas a una re utilización prácticamente integral de otros materiales secundarios.

#### 3.1.6.4 Sistemas de trituración y cribado (2)

Las trituradoras que se utilizan para el procesamiento de los áridos reciclados son las siguientes:

- Trituradoras de mandíbulas: Producen una buena distribución del tamaño del árido para la producción del hormigón, ya que produce una cantidad de finos reducida (menor del 10%)
- Trituradoras de impacto: Son mejores para la trituración de áridos para carreteras. El principal inconveniente que presentan es que sufren un gran desgaste con los impactos. Producen una gran cantidad de finos.
- Trituradoras de cono: El tamaño máximo del árido que admite este tipo de máquina es aproximadamente de 200mm, por lo que son mas apropiadas para la trituración secundaria. (Producción de finos del 20%)

El sistema de cribado sirve para clasificar granulométricamente los productos. Las cribas vibratorias inclinadas con baja frecuencia y gran amplitud son las más apropiadas para separar los finos. (4)

#### 3.1.6.5 Eliminación de impurezas

Los áridos que provienen de las demoliciones tienen varios contaminantes que afectan la calidad del hormigón como puede ser el yeso, plástico, papel, madera, metales; los cuales deben ser eliminados, a continuación se describen cinco sistemas para realizar esta eliminación: (2)

1. Tamizado: Este sistema ayuda a eliminar purezas de menor tamaño, para hacerlo mas efectivo se puede realizar en varias etapas.
2. Eliminación manual: Ayuda a eliminar contaminantes de mayor tamaño que otros sistemas no pueden separar.
3. Separación magnética: Permite eliminar residuos de acero.
4. Separación en seco: Este sistema permite eliminar contaminantes como plasticos, madera o papel, se basa en un sistema de succión.
5. Separación húmeda: Este sistema elimina las impurezas mediante flotación de los materiales ligeros.

#### 3.1.6.6 Almacenamiento

Las recomendaciones que establece la norma japonesa en cuanto al almacenamientos de los áridos reciclados son (10):

- Áridos reciclados de distintas calidades se deben almacenar separadamente.
- Almacenar por separado al árido grueso del árido fino.
- Separar los áridos reciclados de los áridos naturales
- Debido a que la absorción de los áridos reciclados gruesos es muy elevada, es conveniente utilizarlos en estado de saturación.
- Es conveniente no almacenar los áridos finos por periodos largos, ya que estos pueden solidificar en bloque.

### 3.1.7 Normativa de los áridos

La *tabla 2* nos muestra una relación de las normas correspondientes para determinar las propiedades de los áridos:

Norma	Nombre
UNE 83-109:85	Aridos para hormigones. Toma de muestras
UNE-EN 933-2:96	Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
UNE-EN 1097-6:	Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la cantidad de partículas y la absorción de agua.
UNE 7238:71	Determinación del coeficiente de forma del árido reciclado grueso empleado en la fabricación de hormigones.
EN-933-4	Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 4: Determinación de la forma de las partículas . Coeficiente de forma.
UNE-EN 1097-2:99	Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.
UNE 7134:58	Determinación de partículas blandas en áridos gruesos para hormigones.
UNE-EN 1367-2:99	Ensayo de sulfato de magnesio.
UNE-EN 1744-1	Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico.
UNE 7133:58	Determinación de terrones de arcilla en áridos para la fabricación de morteros y hormigones.
UNE-EN 933-7:99	Determinación del contenido de conchas.
UNE 80-217:91	Determinación del contenido de cloruros, dióxido de carbono y alcalinos en los cementos.
DIN 4226-100:2000	Aridos para hormigón y morteros. Aridos reciclados

**Tabla 2:** Normativa para determinar las propiedades de los áridos

## 3.2 MORTEROS

### **3.2.1 Definición**

Mortero: Mezcla de uno o mas conglomerantes inorgánicos, áridos, agua y a veces adiciones y/o aditivos (16).

## **2.2 Introducción a los morteros**

Los morteros se han utilizado desde la antigüedad, hoy en día siguen siendo un material imprescindible en la construcción. Estos han evolucionado a lo largo de su historia en cuanto al método de fabricación, y en las prestaciones que presentan debido a que cada vez se va teniendo mas información acerca de los materiales que lo componen. Actualmente se ha impuesto que los morteros tengan un marcado CE, mediante el cual el fabricante certifica que el mortero satisface todos los requisitos de la directiva de productos de la construcción (27)

Debido a esto, se han establecido una nueva designación de los morteros, los cuales serán los únicos que pueden tener el marcado CE:

1. Morteros de Albañilería
2. Morteros de Revoco/Enlucido. Monocapas (OC)
3. Adhesivos Cementosos (Morteros cola)
4. Morteros Autonivelantes

## **2.3 Clasificación de los morteros**

Los morteros en general pueden clasificarse en función a su uso (26):

1. Mortero para albañilería: Es aquel que se emplea para realizar fabricas de albañilería (cerramientos, muros, tabiques, pilares), así como rejuntado y trabazón de albañilería.
2. Mortero para revoco y enlucido: Son aquellos que se utilizan en la realización de revoco, enfoscados o enlucidos interiores.

Debido a que el estudio del presente trabajo esta enfocado en la fabricación de los morteros de albañilería con áridos finos reciclados provenientes de escombros de hormigón, se explicara a fondo todas las propiedades y características que estos tipos de mortero presentan.

### 3.2.4 Morteros de albañilería

#### 3.2.4.1 Definición

Mortero de albañilería: Mezcla compuesta de uno o varios conglomerantes inorgánicos, de áridos, de agua y, a veces, de adiciones y/o aditivos para fabricas de albañilería (fachadas, muros, pilares, tabiques), rejuntado y trabazón de albañilería. (27)

#### 3.2.4.2 Clasificación de los morteros de albañilería

Los morteros de albañilería según la norma UNE-EN 998-2 (27) se pueden clasificar:

##### 1. según su concepto:

- Morteros de albañilería diseñados: Morteros cuya composición y sistema de fabricación se han elegido por el fabricante con el fin de obtener las propiedades especificadas (concepto de prestación). La prestación corresponde principalmente a la resistencia, con lo cual se designara con la letra “M” seguida de la clase de resistencia a compresión en N/mm<sup>2</sup>. La *tabla 3* nos muestra esta caracterización:

Clase	M-1	M-2,5	M-5	M-10	M-15	M-20	M-d
Resistencia a compresión N/mm <sup>2</sup>	1	2,5	5	10	15	20	d
“d” es una resistencia a compresión mayor de 25 N/mm <sup>2</sup> declarada por el fabricante							

**Tabla 3:** Designación de los morteros según su resistencia

- Morteros para albañilería prescritos: Morteros que se fabrican en unas proporciones determinadas y cuyas proporciones dependen de los componentes que se han declarado (concepto de receta).

##### 2. Según su método de fabricación:

- Mortero de albañilería hecho en fabrica (mortero industrial): Mortero dosificado y mezclado en una fabrica. puede ser “mortero seco” es una mezcla preparada que solamente requiere la adición de agua o “mortero húmedo” que se suministra listo para su empleo.
- Morteros industriales semiterminados: Dentro de este grupo existen 2 tipos de morteros:

a) Morteros predosificados: Son aquéllos cuyos componentes básicos (conglomerante o conglomerantes y áridos) dosificados independientemente en una fábrica, se suministran al lugar de su utilización, donde se mezclan en las proporciones y condiciones especificadas por el fabricante y se amasan con el agua precisa hasta obtener una mezcla homogénea para su utilización.

b) Morteros premezclados de cal y arena: Son aquellos cuyos componentes se han dosificado y mezclado en fábrica para su posterior suministro al lugar de construcción, donde se les puede añadir otro u otros componentes especificados.

### **3.2.5 Componentes de los morteros**

#### **3.2.5.1 Conglomerantes**

Se entiende como conglomerante al material que tiene la capacidad de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efecto de transformaciones químicas en su masa que origina nuevos compuestos (13).

Los conglomerantes utilizados en los morteros se dividen en 2:

##### **3.2.5.1.1 Cales**

Dentro de las cales podemos encontrar dos tipos:

a) Cal aérea: Las cales aéreas hidratadas (apagadas) endurecen únicamente con el aire. Esta cal, amasada con agua y expuesta a la acción del aire, primero fragua por cristalización del hidróxido de calcio y luego endurece al carbonatarse los cristales por acción del  $\text{CO}_2$ . El proceso es lento y el producto resulta poco resistente a la acción del agua

b) Cal Hidráulica: Las hidráulicas, amasadas con agua forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes. El proceso es más rápido que en el caso de la cal aérea y da lugar a productos hidratados, mecánicamente resistentes tanto al aire, como de bajo del agua.

En general, la cal se usa para mejorar algunas propiedades de los morteros como la plasticidad.

##### **3.2.5.1.2 Cementos**

Debido a estar formados por mezclas de caliza, arcilla y yeso que son materiales muy abundantes en la naturaleza, son los conglomerantes hidráulicos mas utilizados en



la construcción. Su precio es relativamente bajo si los comparamos con otros materiales y las propiedades que presentan son muy buenas.

Dentro de los cementos podemos diferenciar varios tipos, cementos comunes (CEM), cementos blancos (BL), resistentes a sulfatos (SR) y/o al agua del mar (MAR).

El cemento Portland es el más común, a continuación se describirá a grandes rasgos como funciona (14):

Este conglomerante hidráulico reacciona como su nombre lo dice con agua, que dependiendo de la consistencia deseada será la cantidad de agua, mientras mas agua contenga la mezcla, este tendrá un valor de escurrimiento mayor, es importante determinar bien la cantidad de agua que se va añadir, ya que si hay un exceso obtendremos una mezcla muy fluida y menos resistente, y por el contrario, si no hay la suficiente agua para hidratar el cemento, obtendremos una mezcla seca poco trabajable.

Una vez agregada el agua al cemento se obtendrá una mezcla plástica, la cual al ir pasando el tiempo ira aumentando su viscosidad y su temperatura.

Pasando un tiempo determinado, que puede oscilar entre los 15 y 120 min, dependiendo de los componentes empleados, la masa tiende a volverse rígida, lo cual da lugar al “principio de fraguado”. Cuando inicia el fraguado es necesario que el mortero este colocado, ya que por el contrario, toda operación de reamasado puede perjudicar las propiedades de la mezcla.

Una vez que empieza el inicio de fraguado, la resistencia mecánica va aumentando, esto se debe a la formación de fases cristalinas insolubles, deshidratando parcialmente la masa, hasta llegar a ser una masa totalmente indeformable, a esta fase se le llama “fin de fraguado”. El tiempo que pasa entre el inicio de fraguado y el fin del fraguado puede variar dependiendo de los componentes, pero oscila entre 45 min y 10 horas.

La fase que sigue después del fin de fraguado se llama “inicio de endurecimiento”, en esta fase la resistencia mecánica de la masa aumenta considerablemente, debido a la consolidación final mediante formación de fases cristalinas que rellenan los huecos y a la evaporación del agua que sobra. Así pues es a 28 días cuando en condiciones normalizadas, se obtiene la resistencia a compresión que define el tipo de mortero.

### 3.2.5.2 Áridos

Se define como áridos a los materiales granulares inorgánicos de tamaño variable.

Su naturaleza es inerte ya que por si solos no reaccionan químicamente con los componentes del cemento o con los agentes externos como por ejemplo el aire, agua, hielo, etc. (13)

Los áridos tienen una gran influencia en las propiedades del material que se va a fabricar cuando estos se unen a un conglomerante.

Existen diferentes tipos de áridos:

- Aridos naturales: Estos provienen de yacimientos minerales, y son obtenidos por procedimientos mecánicos, dentro de este tipo de áridos se encuentran dos tipos:
  - a) Aridos granulares: Son aquellos áridos que se obtienen de las graveras, son usados después de haber pasado por un proceso de clasificación y lavado. Debido a que presentan una forma redondeada, con superficie lisa y sin aristas se les denomina “áridos rodados”.
  - b) Aridos de machaqueo: Este tipo de áridos son producidos en canteras, pasan por un proceso de trituración, molienda y clasificación. La textura que presentan son superficies rugosas y aristas vivas.
- Aridos artificiales: Se les llama áridos artificiales a aquellos que provienen de residuos o procesos industriales, como por ejemplo, las escorias siderúrgicas, cenizas volantes, filleres, etc.
- Aridos reciclados: Estos áridos han sido explicados a profundidad en el capítulo 3.

#### 3.2.5.3 Aditivos

Los aditivos son sustancias o materiales que se le añaden a la masa del mortero durante la mezcla, los cuales tienen como objetivo aportar a las propiedades del mortero, tanto en estado fresco como en endurecido, ciertas modificaciones deseadas como por ejemplo, mayor tiempo de utilización, mayor plasticidad, aire ocluido, etc, con carácter permanente (12).

Los aditivos para los morteros están regidos en la norma UNE-EN 934 y en el prEN 934-3.

Los aditivos pueden clasificarse según las propiedades que aportan a los morteros:

- Aireante: modificadores del contenido de aire
- Plastificantes: modificadores de la reología en estado fresco
- Retardantes: modificadores del tiempo de fraguado y/o endurecimiento
- Hidrofugantes: minimizadores de la absorción de agua
- Retenedores de agua: aumentan la capacidad de retención de agua
- Resinas: Aumento de la adherencia, elasticidad y impermeabilidad

#### 3.2.5.4 Adiciones

Las adiciones con materiales inorgánicos que triturados finamente, se le añaden al mortero con el fin de mejorar ciertas propiedades especiales (13). Algunos ejemplos de adiciones son: Pigmentos, filleres minerales, puzolánicos, cenizas volantes, escorias, etc.

### 3.2.5.5 Agua

El agua que se utiliza para la fabricación de los morteros, debe ser de naturaleza inocua, se debe tener especial cuidado que esta agua no contenga agentes que puedan dañar al mortero como por ejemplo sulfatos, cloruros, etc. ya que estos pueden causar eflorescencias, o en el caso de los morteros que contengan armaduras, la corrosión de estas.

### 3.2.6 Propiedades de los morteros

Para analizar las propiedades de los morteros es necesario identificar los 2 estados en los que el mortero se presenta (13):

1. Estado fresco: Es la fase responde al mortero una vez amasado y mezclado, en esta etapa el mortero es plástico y trabajable lo que permite su puesta en obra. Las propiedades relativas a este estado, se relacionan con la puesta en obra e influirán, principalmente en el rendimiento y calidad de la ejecución.
2. Estado endurecido: Estas propiedades están estipuladas por las prescripciones del proyecto y por el cumplimiento de las exigencias normativas y reglamentarias.

#### 3.2.6.1 Propiedades del mortero en estado fresco

##### 3.2.6.1.1 Consistencia

También conocida como plasticidad. define la manejabilidad o trabajabilidad del mismo. La consistencia deseada se logra mediante la incorporación de agua, la cual varía en función a la granulometría del mortero, absorción de agua de la base sobre la que se aplica, así como las condiciones ambientales. Esta propiedad mejora con la adición de cal, plastificantes o aireantes.

Según la norma UNE-EN 1015-3 (21) se pueden clasificar a los morteros según su consistencia, la *tabla 4* nos muestra es clasificación.

Mortero Fresco	Consistencia (Esgurrimento en mm)	Designación
Seco	<140	S
Plástico	140 a 200	P
Fluido	>200	F

**Tabla 4:** Clasificación de los morteros según su consistencia.

La trabajabilidad se logra con morteros de consistencia plástica, que permiten a la pasta del conglomerante bañar la superficie del árido. En otros casos se forman morteros excesivamente secos no trabajables o muy fluidos con tendencia a la segregación.

#### 3.2.6.1.2 Tiempo de utilización

Es el tiempo durante el cual un mortero posee la suficiente trabajabilidad para ser utilizado sin adición posterior de agua con el fin de contrarrestar los efectos de endurecimiento por el principio de fraguado. Todas las características del mortero en estado fresco han de mantenerse durante este tiempo (13,14)

#### 3.2.6.1.3 Densidad aparente

Esta propiedad está influida por los materiales que conforman el mortero y por el contenido de aire que este presenta. Los morteros ligeros son más trabajables a largo plazo.

#### 3.2.6.1.4 Adherencia

Esta propiedad es considerada tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Consiste en la capacidad del mortero para absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie de la interfase mortero-base. La adherencia del mortero fresco es debida a las propiedades reológicas de la pasta del conglomerante, donde la tensión superficial de la masa del mortero fresco es el factor clave para desarrollar este tipo de característica. La adherencia, antes que el mortero endurezca, se incrementa cuanto mayor es la proporción del conglomerante o la cantidad de finos arcillosos, sin embargo, el exceso de estos componentes pueden perjudicar otras propiedades. (14).

Esta propiedad es muy importante para la persona que aplicara el mortero, ya que un mortero con buena adherencia facilitara el trabajo de los albañiles.

La adherencia en estado fresco, mejora con la incorporación de cal, debido a que las finas capas de cal hidratada tienen más facilidad de penetrar en los poros del soporte al cual se está aplicando, otra razón de esto, es que disminuyen la formación de burbujas de aire, las cuales perjudican la unión entre el mortero y el soporte.

Los factores que influyen en la adherencia en estado fresco son: el tipo de mortero, el tipo de soporte y el grado de humectación del mismo, la técnica con la cual se aplique, condiciones de curado, la presencia de agentes agresivos, etc. (11)

#### 3.2.6.1.5 Contenido de iones cloruro

La presencia de este tipo de agentes, afecta al mortero debido a que estos son los causantes de las corrosiones, con lo cual, si el mortero tiene armaduras, el mortero en presencia de los iones cloruro presentara eflorescencias.

Según la norma UNE-EN 998-2:2003 (27) el contenido de iones cloruro no debe exceder de 0,1% con relación a la masa del mortero seco.

#### 3.2.6.1.6 Capacidad de retención de agua

La trababilidad que presenta el mortero en estado fresco esta influida por esta propiedad, la cual esta relacionada con la superficie especifica de las partículas de árido fino, así como con conglomerante y, en general, con la viscosidad de la pasta (11).

En general los morteros tienden a retener el agua necesaria para hidratar la superficie de las partículas del conglomerante y del árido, y el agua que tenga en exceso la cederá fácilmente al soporte al cual este destinado.

La norma ASTM C-91 "Standard specification for masonry cement fija un valor de retención de agua mínimo del 75%, mientras que la norma IRAM 1685 "Cemento de albañilería" dispone una valor mínimo del 65%

#### 3.2.6.1.7 Contenido de aire

El aire que se encuentra presente en el mortero ayuda a la plasticidad y a la resistencia de los ciclos de hielo y deshielo.

Esta propiedad es muy importante en todo mortero ya que influye mucho tanto en las resistencias mecánicas como en la durabilidad, y esto es debido a que los poros que se encuentran en el interior del mortero, ayudan a la comunicación y transporte de agentes externos hacia el interior, como el agua y el aire, los cuales pueden traer consigo agentes dañinos para el material, y esto se traduce a menores resistencias, mayor permeabilidad y menor adherencia (13).

El contenido de aire es una propiedad que influye con la densidad del mortero tanto en estado fresco como en estado endurecido, ya que a mayor cantidad de poros menor densidad.

### 3.2.6.2 Propiedades de los morteros en estado endurecido

#### 3.2.6.2.1 Resistencia mecánica

En la mayoría de las aplicaciones del mortero, este actúa como elemento de unión resistente compartiendo las sollicitaciones del sistema constructivo del que forma parte.

Dentro de las resistencias mecánicas las mas importantes son la resistencia a flexión y la resistencia a compresión, siendo esta ultima una propiedad indispensable que todo mortero debe cumplir.

La resistencia a flexión es de sumo interés para los morteros de revestimiento, ya que estos morteros son los que deben dar respuesta a este tipo de solicitudes, mientras que para los muros de fabrica, la resistencia a compresión es la que mas importa al trabajar estos bajo compresión.

Los factores que influyen en la resistencia de los morteros son: el tipo de mortero y sus dosificaciones, la calidad de sus componentes empleados, la forma de ejecución, la forma de curado y los agentes agresivos que se presentan en el a lo largo del tiempo.

La sustitución de cal por el cemento Portland influye mucho en la resistencia del mortero, ya que con este ultimo, podemos obtener resistencias mucho mas elevadas a menor tiempo (13).

#### 3.2.6.2.2 Adherencia

Es una de las propiedades mas importantes de los morteros, ya que si la adherencia no se cumple en un mortero-base, las resistencias mecánicas no son efectivas.

La adherencia se basa en la resistencia a tracción de la unión entre un mortero y un soporte definido.

La adherencia depende de tres aspectos fundamentales (13):

- El mortero
- El soporte y su preparación
- La forma de aplicación

Existen dos tipos de adherencia:

a) La adherencia físico-mecánica: Este tipo de adherencia esta fundamentada en el anclaje mecánico entre las piezas. Consiste en que el mortero una vez aplicado en estado plástico al soporte, debe tener la suficiente porosidad para facilitar el anclaje con el soporte, de manera de que el cemento disperso en la pasta de mortero penetre en los poros del soporte y una vez que se empiezan a formar las agujas del cemento hidratado durante el proceso de fraguado, se creen nuevos puntos de anclaje entre el mortero y el soporte.

Los soportes muy absorbentes sustraen el agua del mortero y no permiten la hidratación del cemento en la superficie que los une, por el contrario, los soportes totalmente impermeables impiden la formación del suficiente agarre entre ambos materiales.

b) La adherencia química: Este tipo de adherencia se da al generarse un enlace químico en la superficie de contacto entre el mortero y el soporte.

#### 3.2.6.2.3 Retracción

Es una contracción que sufre el mortero debido a la perdida de volumen del mortero en el proceso de fraguado y principio de endurecimiento. Esta retracción es causada por la perdida de agua sobrante tras la hidratación del mortero.

La retracción aumenta cuanto mayor contenido de cemento, elementos finos y agua tiene el mortero (13)

Existen tres tipos de retracciones:

- Retracción plástica: Es una contracción por desecación durante el proceso de fraguado, cuando el mortero no es capaz de transmitir ni soportar tensiones producidas por la rápida evaporación del agua.
- Retracción hidráulica: Es la contracción del mortero por evaporación del agua, que se produce al haber finalizado el fraguado, si este tipo de contracción es intensa causa un cambio volumétrico capaz de crear tensiones importantes en zonas impedidas a deformarse.
- Retracción térmica: Se produce por la variación en la temperatura de la masa del mortero durante el endurecimiento.

#### 3.2.6.2.4 Absorción de agua

Esta propiedad depende de la estructura capilar del mortero, mientras mas compacto sea este, menor será la red capilar, por lo tanto presentara menor absorción.

La durabilidad el mortero se ve afectada cuanto mayor sea la capacidad de absorción, ya que agua externa entra hacia el interior trayendo con ella partículas contaminantes causando la aparición de eflorescencias.

Para mejorar la absorción de agua, se pueden añadir al mortero, aditivos hidrofugantes, plastificantes y aireantes (12).

#### 3.2.6.2.5 Densidad

La densidad del mortero en estado endurecido dependerá fundamentalmente de la densidad que tenga sus componentes: arenas, adiciones, etc, así como su granulometría y volumen que estos ocupen en su dosificación. Otro factor que influye en la densidad del mortero, es la relación agua/cemento ya que a mayor relación, el mortero será mas poroso, con lo cual se obtendrán morteros con valores de densidad menor (14).

La cantidad de cemento que contiene un mortero también influye en su densidad, ya que mientras menos cantidad de partículas de cemento tengan que hidratarse, mayor será el agua sobrante. Con esto se deduce que, se obtendrán mayores perdidas de agua, y menores densidades a menor contenido de cemento.

Según la normativa UNE-EN-998-2 (27), se pueden considerar morteros ligeros aquellos cuya densidad sea igual o menor que  $1300 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.2.6.2.6 Permeabilidad al vapor de agua

Esta propiedad se refiere a la cantidad de vapor de agua que puede transitar por los poros del material. Aunque un material pueda clasificarse como impermeable al vapor de agua, este siempre tendrá cierto índice de permeabilidad ya sea en mayor o menor proporción.

La permeabilidad al vapor de agua es una propiedad importante y favorable, ya la patología de humedad por condensación es causada por la falta de permeabilidad, trayendo como consecuencias eflorescencias y problemas de durabilidad. (11).

### 3.2.6.2.7 Comportamiento térmico

Esta característica viene dada por la conductividad térmica del material que indica la cantidad de calor que pasa en la unidad de tiempo por una superficie unidad del material.

Esta propiedad depende de la humedad, porosidad y densidad del material. La norma básica NBE-CT-79 fija los valores mostrados en la *tabla 5* en función de la densidad:

Tipo	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (Kcal/hm°C)	$\lambda$ (w/m°C)
Mortero de cemento	2000	1,20	1,40
mortero mixto	1600	0,75	0,87

**Tabla 5:** Valores del comportamiento térmico en función a su densidad

### 3.2.6.2.8 Comportamiento ante el fuego

Para caracterizar el comportamiento ante el fuego de un mortero, existen dos parámetros: La reacción y la resistencia al fuego.

Dentro de la reacción que tiene un material ante el fuego se pueden distinguir cinco tipos: M0, M1, M2, M3 y M4. En la norma NBE-CPI-96 los morteros que se clasifican como M0 son los que menos peligro de reacción ante el fuego tienen.

Según la norma UNE 23093, la resistencia ante el fuego indica el tiempo durante el cual un elemento debe mantener las condiciones que le sean exigibles.



### 3.2.7 Normativa de los morteros

La siguiente *tabla 6* nos muestra la normativa que se utiliza para determinar las propiedades de los morteros tanto en estado fresco como en endurecido:

Norma	Nombre
UNE-EN 1015-1	Determinación de la granulometría
UNE-EN 1015-2	Toma de muestras total de morteros y preparación de los morteros para ensayo
UNE-EN 1015-3	Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)
UNE-EN 1015-4	Determinación de la consistencia del mortero fresco (por penetración del pistón)
UNE-EN 1015-6	Determinación de la densidad aparente del mortero fresco
UNE-EN 1015-7	Determinación del contenido de aire en el mortero fresco
UNE-EN 1015-9	Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco
UNE-EN 1015-10	Determinación de la densidad aparente del mortero endurecido
UNE-EN 1015-11	Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido
UNE-EN 1015-12	Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes
UNE-EN 1015-17	Determinación del contenido de cloruros solubles en agua de los morteros frescos
UNE-EN 1015-18	Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad de los morteros endurecidos.
UNE-EN 1015-19	Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido
UNE-EN 1015-20	Determinación de la compatibilidad de los morteros de revoco monocapa con el soporte

**Tabla 6:** Normativa para determinar las propiedades de los morteros.

## **2.8 Mercado CE en los morteros de Albañilería**

Con el propósito de la comercialización de los materiales de construcción en todos los países de la Unión Europea, a partir de febrero del 2005, la directiva de productos de la construcción, emitida en el año de 1989, estableció que los morteros de albañilería deberían disponer del marcado CE.

El objetivo principal de la directiva de productos de la construcción, es establecer unos requisitos esenciales, que toda obra a la que se incorporen estos productos deben cumplir, estos requisitos son los siguientes:

- Resistencia mecánica y estabilidad
- Seguridad en caso de incendio
- Higiene, salud y medio ambiente
- Seguridad de utilización
- Protección contra el ruido
- Ahorro de energía y aislamiento térmico

Para que estos requisitos se cumplan en toda la Unión Europea, el Comité Europeo de Normalización crea una normativa armonizada. En el caso de esta AENOR, es el organismo encargado de hacer la transposición de la norma europea a la norma española UNE.

Todas las normas UNE incluyen un anexo ZA el cual describen los aspectos que han de verificarse para obtener el marcado CE, el cual indica únicamente la conformidad del producto con requisitos establecidos en la Directiva, es importante mencionar que el marcado CE no es una marca de calidad.

La norma armonizada con la directiva de productos de la construcción en el caso de los morteros es EN 998 “Especificaciones de los morteros para albañilería.”, las versiones españolas de dicha norma son:

- UNE-EN 998-1: 2003 “Morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido.
- UNE -EN 998-2: 2004 “Morteros para albañilería. Parte 2: “Morteros para albañilería”

## 2.9 Trabajos publicados acerca del uso de árido reciclado en morteros

Existen pocos estudios acerca del uso de árido reciclado en morteros, a continuación se describen 4 trabajos para ver lo que se ha estudiado, sus resultados y conclusiones:

### 1.- “Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón” (16):

Este trabajo estudia la incorporación de árido reciclado proveniente de hormigón en morteros de albañilería. Primeramente hacen un estudio de las propiedades de 6 diferentes tipos de árido reciclado, con el estudio de las propiedades de cada tipo, es posible determinar cual de los seis diferentes es el mas apto para la fabricación, teniendo en cuenta como referencia las propiedades de un árido convencional calizo.

Una vez determinado el árido reciclado proveniente de hormigón a utilizar en la fabricación de morteros de albañilería, se procede al diseño de las dosificaciones de los morteros reciclados, en el cual, los porcentajes de sustitución de árido convencional por árido reciclado son del 0, 10, 20, 25, 50, 75 y 100%.

A partir de esta sustitución, se procede a fabricar los morteros reciclados, los cuales son caracterizados en su consistencia, densidad y resistencia mecánica. De los seis morteros fabricados con árido reciclado, se analizan los resultados principalmente de compresión a 28 días y se determina cual de ellos es el que presenta una resistencia semejante a la del mortero con áridos convencionales. La conclusión fue que el mortero cuyo contenido de árido reciclado era del 25%, fue el que presentó valores semejantes a los del mortero patrón.

Los valores obtenidos de la caracterización de los morteros fabricados en este trabajo se muestran en la *tabla7*:

Tipo (% de sust)	H2O (g)	Consist (mm)	Densidad (gr/cm3)	Flexión 7 (Mpa)	Comp 7 (Mpa)	Flexión 28 (Mpa)	Comp 28 (Mpa)
0	13,5	181	2,2129		8,28	3,6	13,92
10	14,0	177	2,1502	1,61	6,03	3,09	11,21
20	14,75	180	2,1071	1,61	5,37	2,55	9,24
25	15,0	179	2,0915	1,40	4,93	2,53	9,17
50	17,5	182	1,9232	0,83	2,58	1,44	5,11
75	21	178,5	1,8354	0,51	1,53	0,92	3,10
100	22,5	173	1,7131	0,40	1,10	0,64	2,13

**Tabla 7:** Resultados obtenidos del artículo ()

Una vez determinado que el porcentaje de 25% no sacrifica las propiedades del mortero, se prosigue a añadir aditivos para mejorar aun mas las propiedades del mortero reciclado. Los aditivos que se agregaron a la mezcla del 25%, fue un aditivo que combinara un agente aireante con una acción plastificante (reductora de agua), para poder controlar la excesiva demanda que presentan estas arenas.

Posteriormente a esto se vuelve hacer la caracterización del mortero de un contenido de árido reciclado del 25% pero ahora con su aditivo correspondiente, en donde obtienen resultados en resistencia incluso mayores que los que presenta el mortero patrón.

En el trabajo que se esta describiendo no abordan el tema del contenido de cal, cabe destacar que el presenta trabajo analizara la influencia que tiene la cal en las propiedades del los morteros de albañilería con áridos reciclados.

## 2.- *“Agregado reciclado para mortero” (18):*

En este trabajo se estudia la viabilidad de la incorporación del árido reciclado obtenido de probetas descartas de hormigón en los morteros en general. Los principales objetivos que tiene este estudio es caracterizar estos áridos, evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los morteros reciclados, y realizar un análisis morfológico del agregado reciclado y natural, y petrográfico de los morteros elaborados con estos dos tipos de áridos para ver su influencia en la resistencia del mortero.

En el se concluye que la forma de los áridos reciclados es mas angular, a diferencia de la del árido natural que presenta una forma mas redonda, este factor influye en las resistencias del mortero a edades tempranas, trayendo consigo mayores resistencias a 7 días que los morteros fabricados con árido natural, pero en resistencias de 28 días la forma del árido reciclado, influye disminuyendo su resistencia.

## 3.- *“CDW variability and its influence on masonry and plastering mortars properties” (15):*

En este estudio, se utilizaron áridos provenientes de cerámica, hormigón y mortero, los cuales fueron mezclados en diferentes proporciones, dichas proporciones fueron caracterizadas, según su absorción de agua, densidad y contenido de finos. Una vez obtenido dichos valores de caracterización se escogió la mezcla cuya proporción de los diferentes áridos reciclados fuera la mas optima, es decir, aquellos áridos cuyas propiedades se asemejen mas a las propiedades de los áridos convencionales. El principal problema encontrado fue la alta absorción que presentaban los áridos reciclados así como su baja densidad.

Con esta mezcla de áridos se procedió a la fabricación de morteros, a los cuales se les ensayo su consistencia, densidad en fresco y la resistencia mecánica a flexión y compresión a 28 días.

En este estudio, para lograr la consistencia de todos los morteros fabricados con diferentes porcentajes de árido reciclado fino mixto, fue necesario agregar diferente tipo

de agua según la demanda del mortero, se puede observar un coeficiente de variación entre el valor máximo y el valor mínimo del 20,5%.

En cuanto al valor de la densidad, el coeficiente de variación entre el valor máximo y el valor mínimo tenemos un 2,0%, y finalmente la compresión a 28 días el coeficiente de variación entre los valores máximo y mínimo es bastante grande teniendo un 57,8%.

#### 4.- *“Áridos reciclados para hormigones y morteros” (17):*

Este trabajo estudia la propiedades de los áridos reciclados compuestos por residuos de hormigón y asfalto, tales como su coeficiente de absorción, índice de lajas, coeficiente de los ángeles; para ver la posibilidad de la incorporación de estos a los morteros y hormigones.

Una vez determinadas las propiedades de los áridos se procede a la fabricación de los morteros reciclados a los cuales se les determino sus propiedades de contenido de aire, retención de agua y compresión a 28 días.

La conclusión de este trabajo es que dichos áridos formados por residuos de hormigón y asfalto, son aptos para la fabricación de hormigones y morteros.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1 Introducción**

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de este trabajo es fabricar morteros de albañilería con árido reciclado fino proveniente de hormigón.

Para esto, se fabricaron morteros convencionales de la marca Promsa con cal y sin cal, así como morteros con diferentes tipos de dosificación de áridos reciclados.

Primeramente se hizo una caracterización de los materiales utilizados los cuales son: árido reciclado, árido convencional, mortero de la marca Promsa con cal y sin cal.

Seguido de esta caracterización se fabricaron los morteros con áridos convencionales, es decir, los morteros de referencia, y se analizaron algunas de sus propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Una vez obtenidos los valores de las propiedades de los morteros de referencia, se fabricaron los morteros con áridos reciclados con el mismo contenido de agua, de cemento y de cal (en el caso de los morteros con cal), pero con diferente contenido de áridos reciclados, y se analizaron sus propiedades bajo los ensayos correspondientes.

Finalmente se compararon las propiedades de los morteros reciclados con las propiedades de los morteros convencionales con el fin de llegar a una conclusión, para saber cual es el limite de contenido de áridos reciclados que puede contener un mortero de albañilería sin que sus propiedades se vean afectadas.

### **4.2 Caracterización de los materiales**

#### **4.2.1 Granulometría**

El ensayo de la granulometría de los materiales se hizo bajo la norma EN-933-1 “Determinación de la granulometría de partículas para los áridos finos reciclados. Método del tamizado”

Este ensayo consiste en separar de forma mecánica, mediante una serie de tamices organizados de forma decreciente, un material en varias fracciones granulométricas.

Los tamices utilizados fueron: 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,025mm, 0,0125mm, 0,063mm.

Los materiales ensayados fueron el árido fino reciclado, el árido convencional, el mortero de Promsa sin cal y mortero Promsa con cal.

#### **4.2.2 Composición mineralógica**

La composición mineralógica de los materiales fue analizada por medio de la difracción de rayos X (DRX).

DRX: Es una herramienta poderosa que se aplica principalmente a la identificación de sustancias cristalinas o semicristalinas capaces de producir difracción, al estudio de su grado de cristalinidad y la realización de una semicuantificación de las mismas. (Historia, caracterización y restauración de morteros).

En este caso, para el análisis de DRX se ha utilizado un difractómetro *Siemens D-500*, con radiación  $K\alpha$  Cu ( $\lambda = 1,5418\text{\AA}$ ), monocromador de grafito y detector de centelleo, bajo unas condiciones del tubo de rayos X de 30 mA y 40 kV. La velocidad angular de  $0,05$  ( $2\theta$ ) cada 3 segundos, con un rango de barrido de  $2\theta$  entre  $4^\circ$  y  $70^\circ$ .

El reconocimiento de los compuestos formadores es posible a partir de las fichas del JCPDS (*Joint Committee for Powder Diffraction Standards*), en las cuales se describe la celda primitiva, los índices de Miller ( $hkl$ ), el espaciado reticular ( $d$ ) y la intensidad porcentual de la difracción experimental ( $I$ ). En los difractogramas se representa la intensidad de difracción en función de  $2\theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo entre el haz de rayos X y el plano cristalino que difracta. El ángulo de difracción  $\theta$  se relaciona con la distancia entre planos,  $d$ , y la longitud de onda del rayo incidente,  $\lambda$ , a través de la fórmula de Bragg: (Power Diffraction File search Manual)

$$\lambda = 2 d \sin \theta$$

Los materiales analizados mediante la DRX fueron:

- Arido reciclado
- Arido convencional
- Mortero Promsa sin cal
- Mortero Promsa con cal
- Filler del mortero sin cal
- Filler del mortero con cal

#### 4.2.3 Composición química elemental

Para estudiar la composición química de los materiales, se utilizó la técnica de Fluorescencia de rayos X (FRX).

Mediante esta técnica instrumental se analizan muestras que se han fundido con tetraborato de litio para fabricar una perla sólida. Posteriormente se irradia con un haz de rayos X de longitud corta para excitar a los átomos, que emiten una fluorescencia con un espectro característico que es el que se analiza. (Historia, caracterización y restauración de morteros).

Los materiales analizados mediante la DRX fueron:

- Arido reciclado
- Arido convencional
- Mortero Promsa sin cal

- Mortero Promsa con cal
- Filler del mortero sin cal
- Filler del mortero con cal

#### 4.2.4 Densidad y absorción

Este ensayo se realizó conforme a la norma EN 1097-6:2000 “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua”, por medio de la técnica del picnómetro.

Los materiales ensayados fueron los áridos convencionales y los áridos reciclados.

### 4.3 Estudio de morteros

#### 4.3.1 Dosificación y designación de morteros

Para la dosificación de los morteros reciclados se trato de ajustar la curva granulometrica de los áridos reciclados a la curva de los morteros tanto con cal como sin cal.

##### 4.3.1.1 Tipos de morteros sin cal

Dependiendo de la dosificación de cada mortero, se designo a cada uno con un nombre, dependiendo del porcentaje de áridos reciclados que este contenga, dichos nombres se explican a continuación:

- MR 100 s/c : Mortero con un contenido de áridos reciclados del 100% sin cal.
- MR 75 s/c : Mortero con un contenido de áridos reciclados del 75% sin cal.
- MR 50 s/c : Mortero con un contenido de áridos reciclados del 50% sin cal.
- MR 25 s/c : Mortero con un contenido de áridos reciclados del 25% sin cal.
- MR0 s/c : Mortero con un contenido de áridos reciclados del 0% sin cal, es decir, todos sus áridos son convencionales.

##### 4.3.1.2 Tipos de morteros con cal

Al igual que en el caso de los morteros sin cal, para poder identificar cada tipo de mortero, se le dio un nombre dependiendo del contenido de áridos reciclados y de la cantidad de cal añadida, estos nombres se explican a continuación:

- MR 100 cal 0,5 : Mortero con un contenido de áridos reciclados del 100%, y del volumen total de filler, 50% de cal y 50% de cemento
- MR 100 cal 0,25 : Mortero con un contenido de áridos reciclados del 100% y del volumen total de filler, 25% de cal y 75% de cemento
- MR 25 cal 0,5: Mortero con un contenido de áridos reciclados del 25% y del volumen total de filler, 50% de cal y 50% de cemento



- MR 25 cal 0,25: Mortero con un contenido de áridos reciclados del 25% y del volumen total de filler, 25% de cal y 50% de filler.

### 4.3.2 Fabricación de morteros

La fabricación de los morteros se realizó conforme a la norma UNE-EN 1015-2:1999 “Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo”.

### 4.3.3 Propiedades de los morteros

#### 4.3.1 Propiedades de los morteros en estado fresco

##### 4.3.1.1 Consistencia

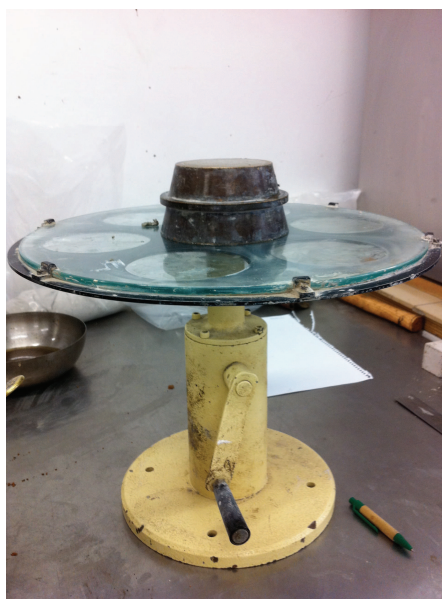
La consistencia de los morteros reciclados sin cal, fue ensayada para cada tipo de mortero, bajo la norma UNE-EN 1015-3 “Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).” (22)

Este ensayo consiste en medir el valor de escurrimiento que tiene el mortero una vez amasado, en una mesa de sacudidas normalizada.

En la *figura 1, 2, 3 y 4* se muestra el principio de este ensayo:



**Fig. 1:** llenado y compactado de molde



**Fig. 2:** Molde enrasado listo para sacudir



**Fig. 3:** Aplicación del sistema de sacudidas



**Fig. 4:** Medida del valor de escurrimiento

#### 4.3.1.2 Densidad aparente del mortero fresco

La densidad aparente del mortero fresco se ensayo conforme a la norma UNE-EN 1015-6: 1999 “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.”(23)

Este ensayo consiste en medir en un molde con medidas normalizadas, llenado y compactado según la norma, el peso del mortero en estado fresco.

En la *figura 5, 6 y 7* se muestra el principio del ensayo:



**Fig. 5:** Molde metálica rellena



**Fig. 6:** Enrasado del molde

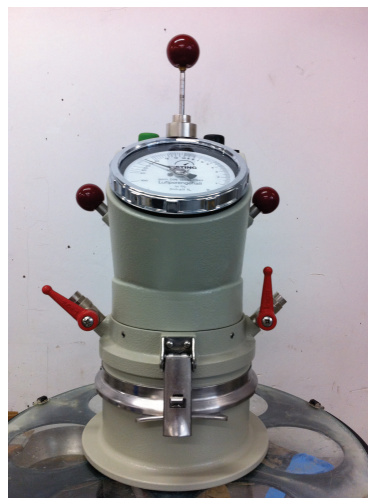


**Fig. 7:** Molde listo para pesar

#### 4.3.1.3 Contenido de aire

El contenido de aire ocluido en la mezcla se ensayo según la norma UNE-EN “métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido de aire en el mortero fresco.”(24)

En este caso de utilizo el método “A” que describe esta norma llamado método de presión, para este caso es necesario el equipo especificado el cual comprende de un cilindro metálico con una tapa sobre la cual hay una cámara de aire conectada a un manómetro que nos indica cual es la cantidad de aire inyectada, y dos válvulas una de aireación y otra de salida de aire. La maquina es de la empresa de Controls, cuyo código de referencia en 64-CO171, la maquina se muestra en la *figura 8 y 9*:



**Fig. 8 y 9:** Maquina de medidor de contenido de aire (controls)

#### 4.3.1.4 Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua de los morteros fabricados fueron realizados según la norma UNE 83-816-93:1993 “Morteros. Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la capacidad de retención de agua”. (29)

La muestra de mortero fresco se somete a un tratamiento de succión normalizado, usando un papel filtro como sustrato. En un molde con medidas especificadas en la norma se coloca la muestra de mortero, se enrasa, se pesa y después se colocan 8 papeles filtro, se coloca una pieza de vidrio, se invierte la muestra y se pone un sobre peso de 2kg durante 5 min, después de dicho tiempo se retiran los papeles filtro y se pesan.

Para calcular la cantidad de agua retenida en el mortero que esta en el molde normalizado se hace una relación de la cantidad original de agua que había en el molde con la cantidad de agua absorbida, se expresa en tanto por ciento.



### 4.3.2 Propiedades de los morteros en estado endurecido

#### 4.3.2.1 Densidad aparente en seco

Este ensayo fue realizado mediante la norma UNE-EN 1015:1999 “Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido”(25).

Una vez teniendo la probeta a ensayar curada a 28 días según la norma UNE-EN 1015-11, se sumerge bajo agua en la cámara de curado a temperatura constante de 24°C por un periodo de 24 horas.

Después de dicho tiempo cada elemento fue pesado en una balanza tanto su peso bajo el agua como su peso saturado seco.

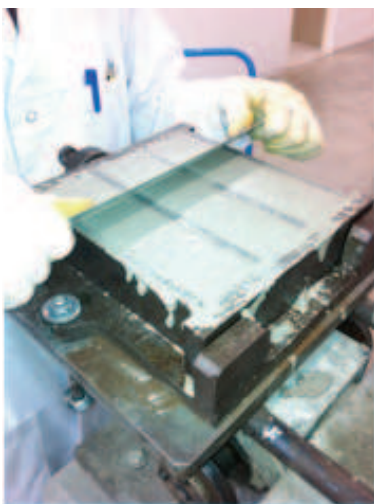
Posteriormente los elementos se colocaron en una cámara seca a una temperatura constante de 100 °C por un periodo de 24 horas.

Por ultimo, pasado dicho tiempo, se midió el peso seco de cada elemento.

#### 4.3.2.2 Resistencia a flexión y compresión

Este ensayo fue realizado según la norma UNE-EN 1015-11 “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.” (26)

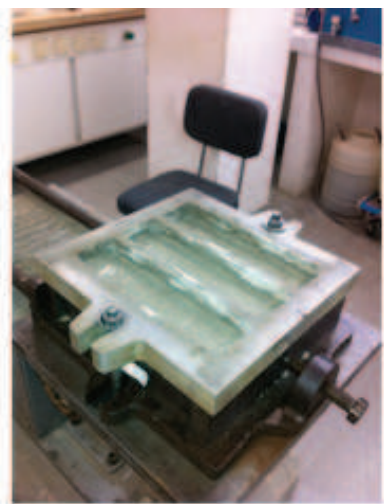
Para este ensayo se realizaron probetas prismáticas según la norma antes mencionada. Una vez amasada la muestra, se prosigue a rellenar los moldes, el método de compactación fue mecánicamente, las *figuras 12, 13 y 14* muestran un poco este procedimiento:



**Fig. 12:** Molde metálico vacío



**Fig. 13:** Molde relleno según norma



**Fig. 14:** Enrasado del molde

Después de este procedimiento, los moldes se sitúan dentro de la cámara húmeda, para que al cabo de 24 horas, se puedan desmoldear. Una vez desmoldeadas las probetas, se vuelen a colocar en la cámara húmeda hasta los 28 días, que es el

tiempo que marca la norma en el cual la resistencia tanto a flexión como a compresión deben ensayarse.

Para el ensayo a flexión, la carga se aplica sin aceleraciones bruscas, a una velocidad uniforme comprendida entre 10 N/s y 50 N/s, de tal modo que la rotura se produzca entre 30 s y 90 s (26).

Este ensayo se realiza a las 3 probetas que se fabricaron de la misma mezcla, se saca una media y ese será el valor de la resistencia a flexión del mortero.

La *figura 15* nos muestra la maquina que se utilizo para el ensayo a flexión:



**Fig. 15:** Maquina de ensayo a Flexión

Para el análisis de la resistencia a compresión, se utilizan las mismas probetas que se ensayaron a flexión, por lo tanto en lugar de tener 3 resultados como en el caso del ensayo a flexión, obtendremos 6, igualmente la media de las 6 probetas, será la resistencia a compresión del mortero.

La *figura 16* nos muestra la maquina que se utilizo para el ensayo de resistencia a compresión:



**Fig. 16:** Maquina de ensayo a compresión

## 5. RESULTADOS Y DISCUSION

### 5.1 Caracterización de materiales

#### 5.1.1 Conglomerantes

##### 5.1.1.1 Cemento

El cemento utilizado en la fabricación de los morteros fue un cemento de la marca CEMEX cuyo nombre es CEM II/A-II 42,5 R. Las especificaciones de este cemento que fueron tomadas de la pagina web de [www.cemex.es](http://www.cemex.es), se muestran en la tabla 7:

CEM II / A-LL 42,5 R	
Componentes	
Clinker	80 a 94 %
Caliza LL	6 A 20 %
Componentes adicionales	0 a 5 %
Características químicas	
Anhidrido Sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	≤ 4,0 %
Cloruros (Cl)	≤ 0,1 %
Características físicas	
Principio de fraguado	≥ 60 minutos
Expansión de Chatelier	≤ 10 mm
Resistencias a compresión	
2 días	≥ 20,0 Mpa
28 días	≥ 42,5 Mpa

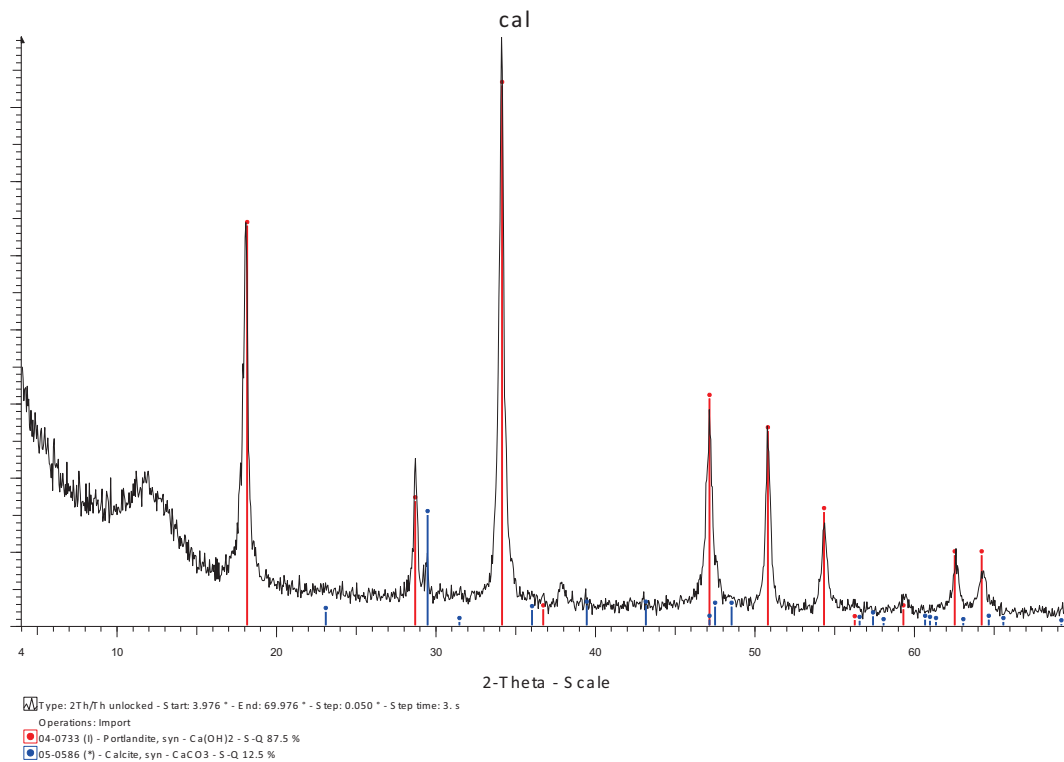
**Tabla 7:** Caracterización del cemento CEM II/A-II 42,5 R

La elección de este cemento fue debido a que sus características son las mas adecuadas para el uso en albañilería por ser mas plástico y de menor tendencia a la retracción.

##### 5.1.1.2 Cal

Se utiliza una cal hidratada de la marca Pacsa, la cual fue analizada por medio de la técnica difracción de Rayos X, en la *figura 17* se puede observar el difractograma, el

cual nos muestra la presencia predominante de hidróxido de calcio ( $\text{CaOH}_2$ ) también conocida como Portlandita; y la presencia de calcita aunque en menor cantidad.



**Fig. 17:** Difractograma de la cal

## 5.1.2 Aridos

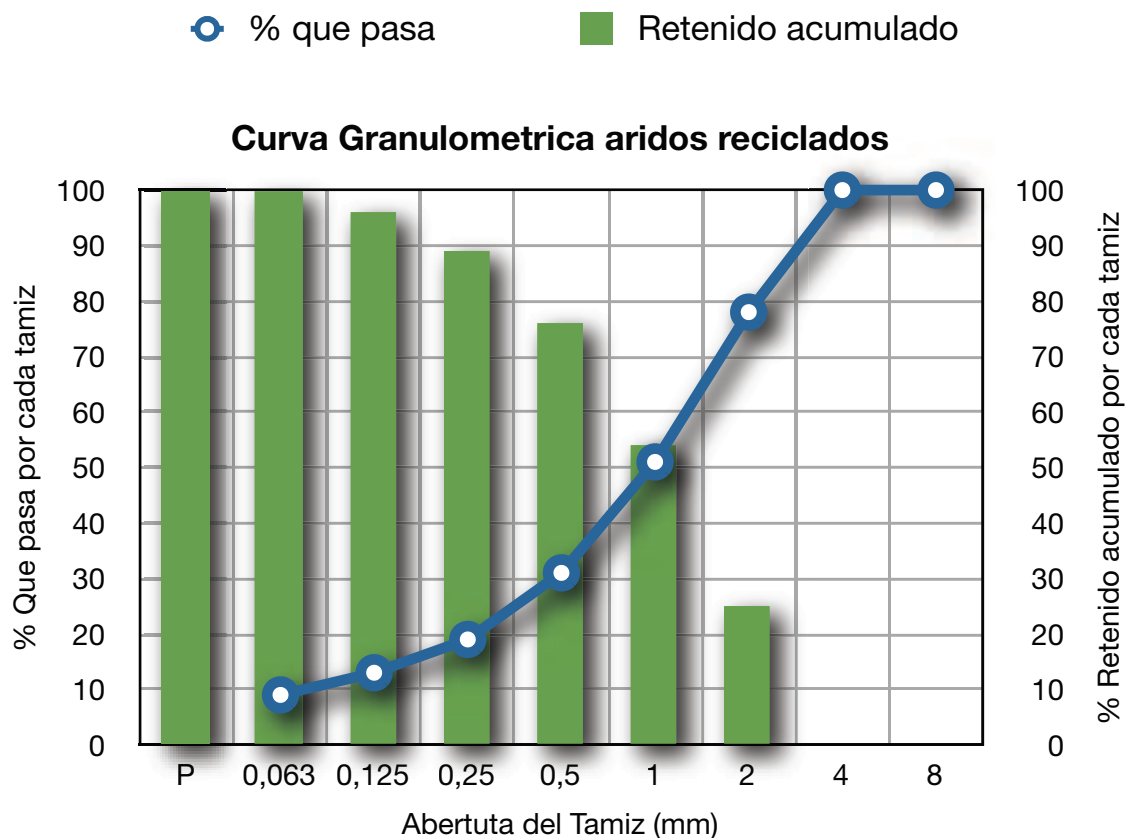
### 5.1.2.1 Granulometría

#### *Arido reciclado*

Los resultados de la granulometría del árido reciclado se exponen en la *tabla 8*, así como su curva granulometrica que se muestra en la *gráfica 2*:

Tamaño de abertura del tamiz mm	Nombre del tamiz	Masa del material retenido (Ri) gr	Porcentaje del material retenido $R_i/M_1 \times 100$	Porcentaje del material retenido acumulado	Porcentajes acumulados que pasan $100-(R_i/M_1 \times 100)$
8	R1	0	0	0	100
4	R2	0,25	0	0	100
2	R3	90,25	22	22	78
1	R4	108	27	49	51
0,5	R5	79,7	20	69	31
0,25	R6	48,55	12	81	19
0,125	R7	25,45	6	87	13
0,063	R8	14,65	4	91	9
Bandeja de fondo	P	1,55	0	100	

**Tabla 8:** Granulometría del árido reciclado



**Gráfica 2:** Curva granulometrica del árido reciclado

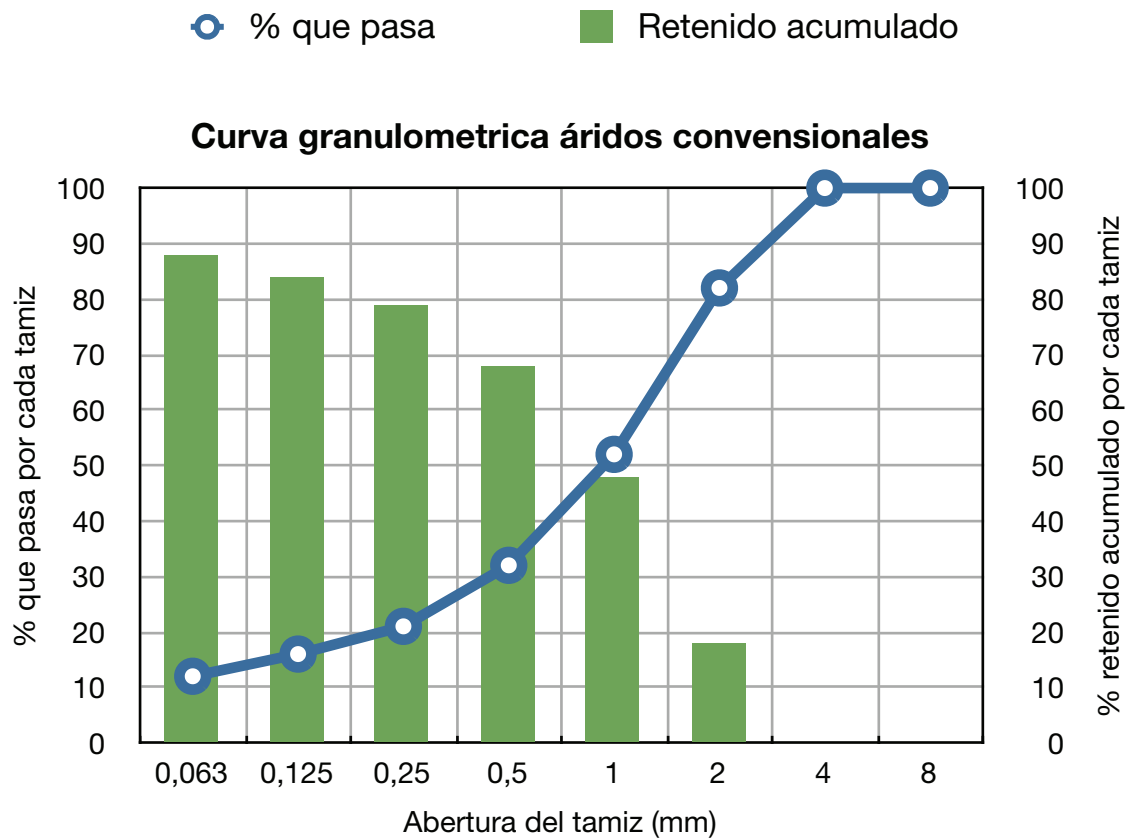
En este ensayo se puede observar que el contenido de filler, es decir, de áridos con un tamaño  $<0,063$  mm, es del 9%, teniendo un 91% de partículas  $>0,063$  mm.

Es importante hacer una comparación de la granulometría de ambos áridos, tanto de los reciclados como de los convencionales, por lo tanto los resultados correspondientes a la granulometría del árido convencional se muestran en la *tabla 9*, así como su curva granulometrica expuesta en la *gráfica 3*:

Tamaño de abertura del tamiz mm	Nombre del tamiz	Masa del material retenido (Ri) gr	Porcentaje del material retenido $Ri/M1 \times 100$	Porcentaje del material retenido acumulado	Porcentajes acumulados que pasan $100-(Ri/M1 \times 100)$
8	R1	0	0	0	100
4	R2	0,9	0	0	100
2	R3	52,8	18	18	82
1	R4	90	30	48	52
0,5	R5	56,9	19	68	32
0,25	R6	32,3	11	79	21
0,125	R7	16,8	6	84	16
0,063	R8	11,1	4	88	12
Bandeja de fondo	P	0	0	100	

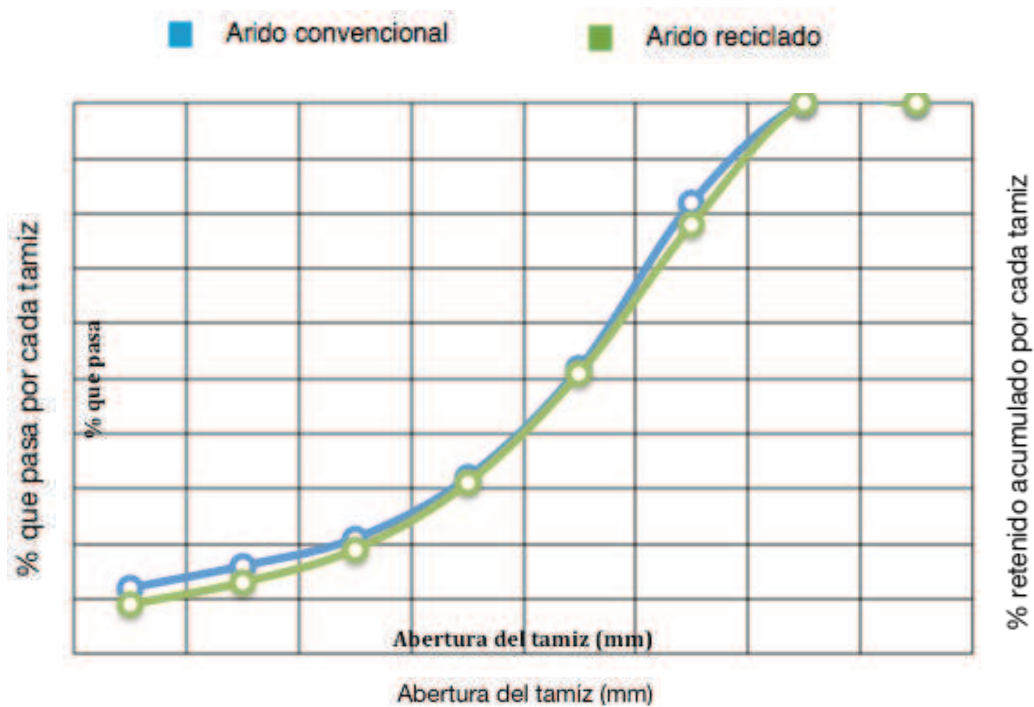
**Tabla 9:** Granulometría del árido convencional





**Gráfica 3:** Curva granulometrica del árido convencional

Los resultados de esta granulometría nos muestran que el porcentaje de filler es de 12%, la *gráfica 4*, nos muestra la comparación de ambas curvas:



**Gráfica 4:** Comparación de la granulometría del árido reciclado y convencional

Se observa que la granulometría del árido reciclado es prácticamente idéntica a la del árido convencional, siendo la diferencia más significativa el contenido de filler que es mayor en el árido convencional.

#### 5.1.2.2 Densidad y absorción

Este ensayo se realizó a ambos áridos, tanto al reciclado como al árido convencional.

Los resultados de la densidad y absorción del árido convencional se muestran en la *tabla 10*:

Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua UNE-EN 1097-6				Fecha: 17/03/2011
Tipo de densidad	Pa (gr/cm <sup>3</sup> )	Prd (gr/cm <sup>3</sup> )	Pssd (gr/cm <sup>3</sup> )	WA <sub>24</sub> (%)
Muestra	2,7000	2,6440	2,6700	0,6850
Fracción granulométrica del árido convencional: desde 4 mm - 0,063 mm			Laboratorio: Materiales de construcción UPC, Barcelona, España.	

**Tabla 10:** Densidad y absorción del árido convencional

Siendo:

Pa = Densidad aparente

Prd = Densidad de las partículas tras secado

Pssd = Densidad de las partículas saturadas con superficie seca

WA<sub>24</sub> = Coeficiente de absorción de agua

Los resultados de la densidad y absorción del árido reciclado se muestran en la siguiente *tabla 11*:

Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua UNE-EN 1097-6				Fecha: 17/03/2011
Tipo de densidad	Pa (gr/cm <sup>3</sup> )	Prd (gr/cm <sup>3</sup> )	Pssd (gr/cm <sup>3</sup> )	WA <sub>24</sub> (%)
Muestra	2,7190	2,1790	2,3770	9,1000
Fracción granulométrica del árido reciclado: desde 4 mm - 0,063 mm			Laboratorio: Materiales de construcción UPC, Barcelona, España.	

**Tabla 11:** Densidad y absorción del árido reciclado

Primeramente analizando la absorción de agua que presentan ambos áridos, se puede observar claramente la gran diferencia, ya que la absorción de agua en el árido convencional es de 0,68% y para el árido reciclado es de 9,1%. Esta propiedad en los áridos influye negativamente en la resistencia final del mortero, debido a que la alta

absorción de agua, aumenta la cantidad de agua necesaria para la producción de un mortero trabajable.

La alta absorción de agua en los áridos reciclados es uno de los principales problemas que se tiene en cuenta a la hora de utilizar el árido reciclado, y aumenta aun mas cuando este disminuye en tamaño, esto es debido a la pasta de mortero que tiene el árido adherida a su superficie.

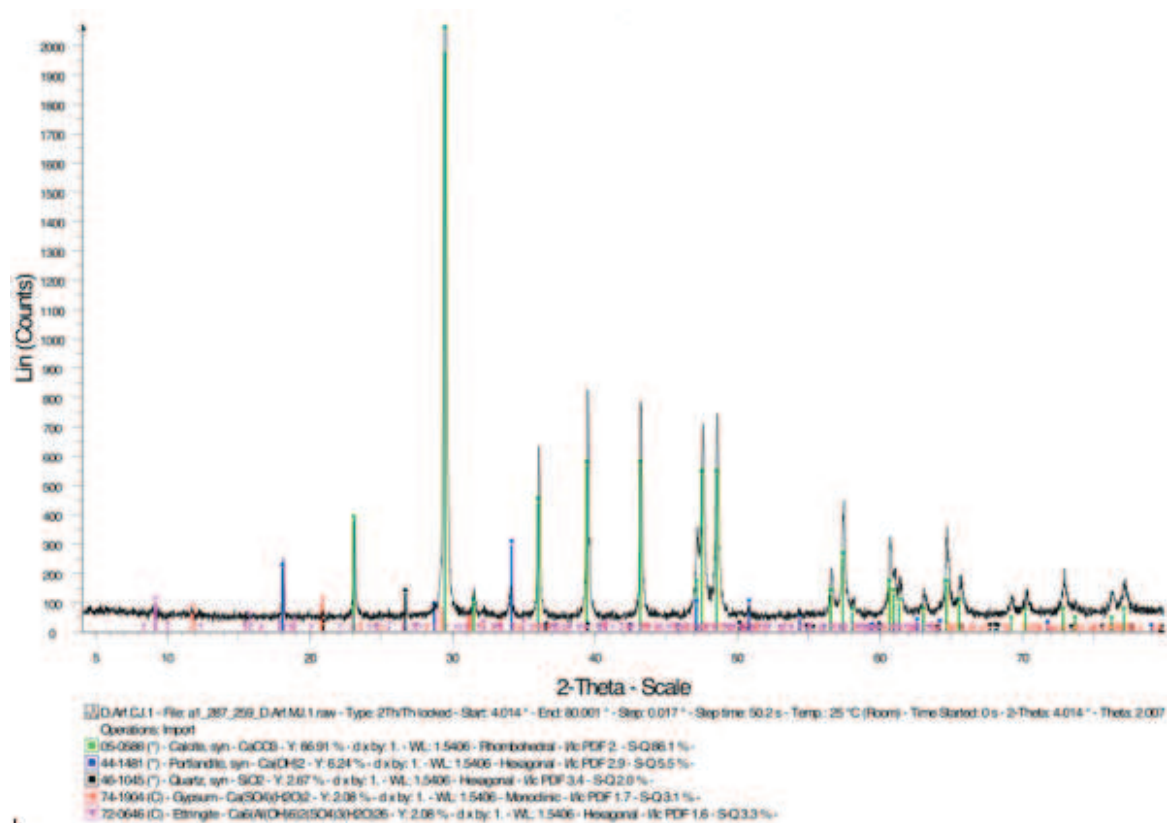
Como se ha explicado en el apartado 5.1, los áridos se han preparado en la condición de saturados con superficie seca, esto para evitar que el árido consuma el agua añadida para la mezcla, siendo esta totalmente efectiva.

Ahora bien, con respecto a la densidad, también se puede observar una disminución en los áridos reciclados, esto es también debido a la pasta de mortero que tienen adherido, o a la calidad del hormigón del que proceden, otro factor que influye en la densidad es el método de trituración. Tenemos una densidad de 2,644 gr/cm<sup>3</sup> para los áridos convencionales, y 2,179 gr/cm<sup>3</sup> para los áridos reciclados.

La resistencia del mortero se puede ver afectada cuanto menor sea la densidad del árido que se utilice.

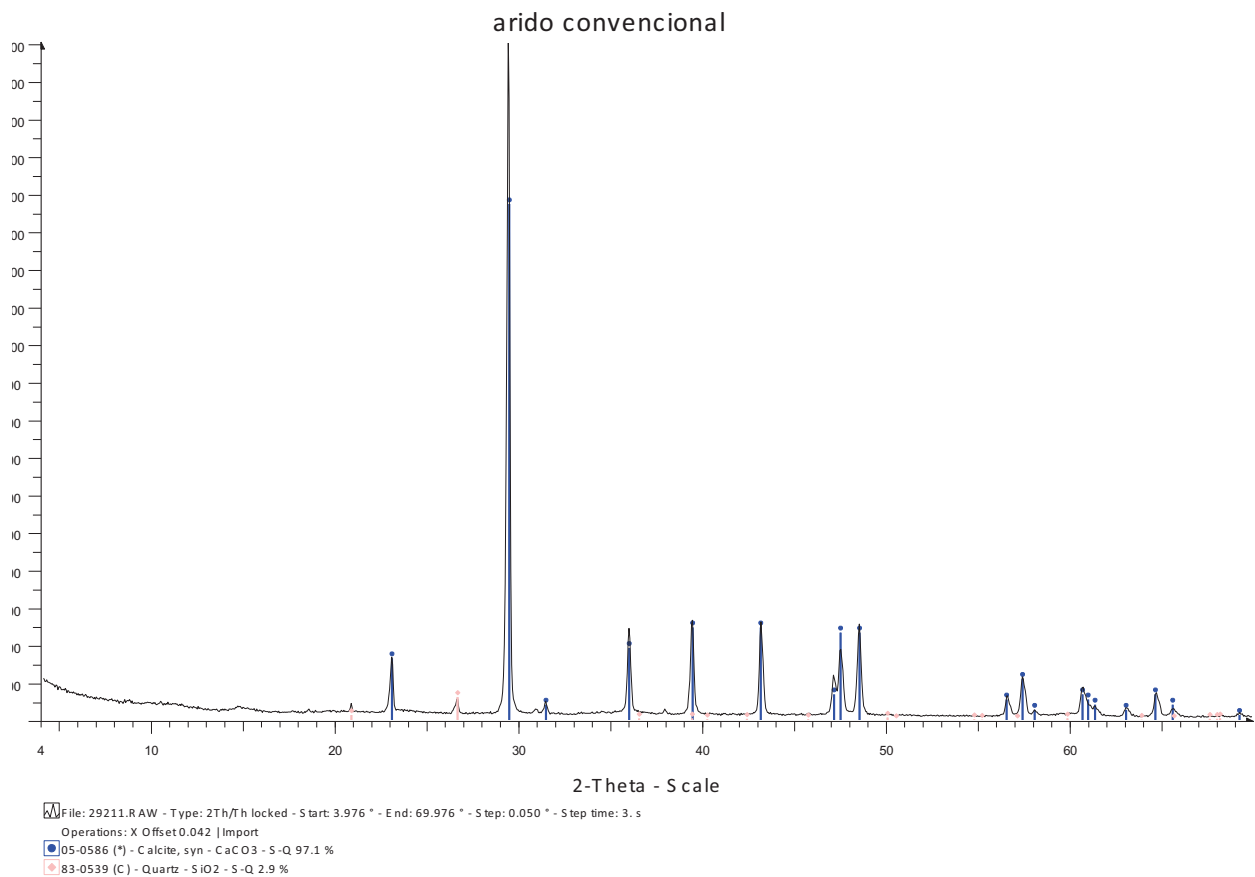
### 5.1.2.3 Difracción de Rayos X

El difractograma resultante de la difracción de rayos X, del árido fino reciclado se muestra en la *figura 18*:



**Fig. 18:** Difractograma del árido reciclado

El difractograma que se obtuvo en la DRX del árido convencional es el que se muestra en la *figura 19*:



**Fig. 19:** Difractograma del árido reciclado convencional

La *tabla 12* nos muestra un resumen de los difractogramas tanto del árido convencional como del árido reciclado:

Composición mineral	Arido reciclado fino	Arido convencional
Calcita	XX	XX
CH	X	
Yeso	i	
Cuarzo		X

**Tabla 12:** Resultados de DRX en árido reciclado y convencional

Donde:

XX : Mucha presencia

X: Poca presencia

i: Indicios

Se puede observar que el árido reciclado proviene de un hormigón de árido calizo el cual no estaba totalmente carbonatado ya que se detecta la presencia de Portlandita. Adicionalmente a esto, el árido reciclado presenta indicios de yeso, el cual tiene su origen en el cemento Portland.

Respecto al árido convencional se confirma la presencia mayoritaria de caliza y un porcentaje menor de cuarzo.

#### 5.1.2.4 Fluorescencia de Rayos X

La *tabla 13* nos expone los resultados obtenidos de la fluorescencia de rayos X (FRX) del árido reciclado y del árido convencional:

Elemento expresado en Oxidos	Arido reciclado	Arido convencional
MgO	0,7281	0,6020
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5740	0,6290
SiO <sub>2</sub>	4,9015	1,3547
SO <sub>3</sub>	0,7058	0,1930
CaO	50,8133	52,8938
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,0042	0,2683
SrO	0,04263	0,0329
BaO	0,2267	0,1718
<b>Perdida al fuego</b>	<b>39,96</b>	<b>43,74</b>

**Tabla 13:** Resultados de FRX en árido reciclado y convencional

Se observa la presencia de los mismos elementos mayoritarios en ambos áridos. El mayor contenido de sílice, aluminio y hierro del árido reciclado se debe a la presencia de la pasta del cemento.

#### 5.1.3 Morteros comerciales

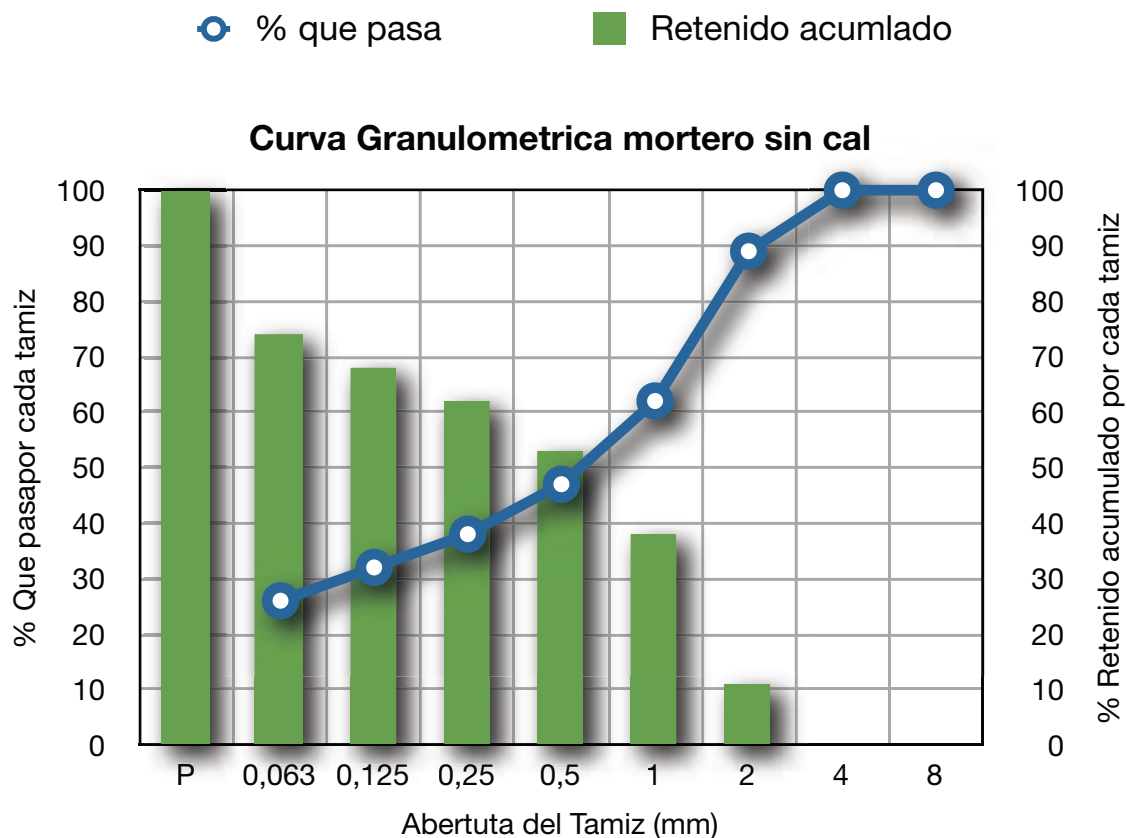
##### 5.1.3.1 Granulometría

###### *Mortero Promsa sin cal*

La *tabla 14* nos muestra los resultados obtenidos del ensayo de granulometría del mortero Promsa sin cal, así como la *gráfica 5*, que muestra su curva granulométrica:

Tamaño de abertura del tamiz mm	Nombre del tamiz	Masa del material retenido (Ri) gr	Porcentaje del material retenido $Ri/M1 \times 100$	Porcentaje del material retenido acumulado	Porcentajes acumulados que pasan $100-(Ri/M1 \times 100)$
8	R1	0	0	0	100
4	R2	0	0	0	100
2	R3	39,95	11	11	89
1	R4	96,8	27	38	62
0,5	R5	54,1	15	53	47
0,25	R6	33,45	9	62	38
0,125	R7	21,4	6	68	32
0,063	R8	21,15	6	74	26
Bandeja de fondo	P	94,7	27	100	0

**Tabla 14:** Granulometría del mortero Promsa sin cal



**Gráfica 5:** Curva granulométrica del mortero sin cal

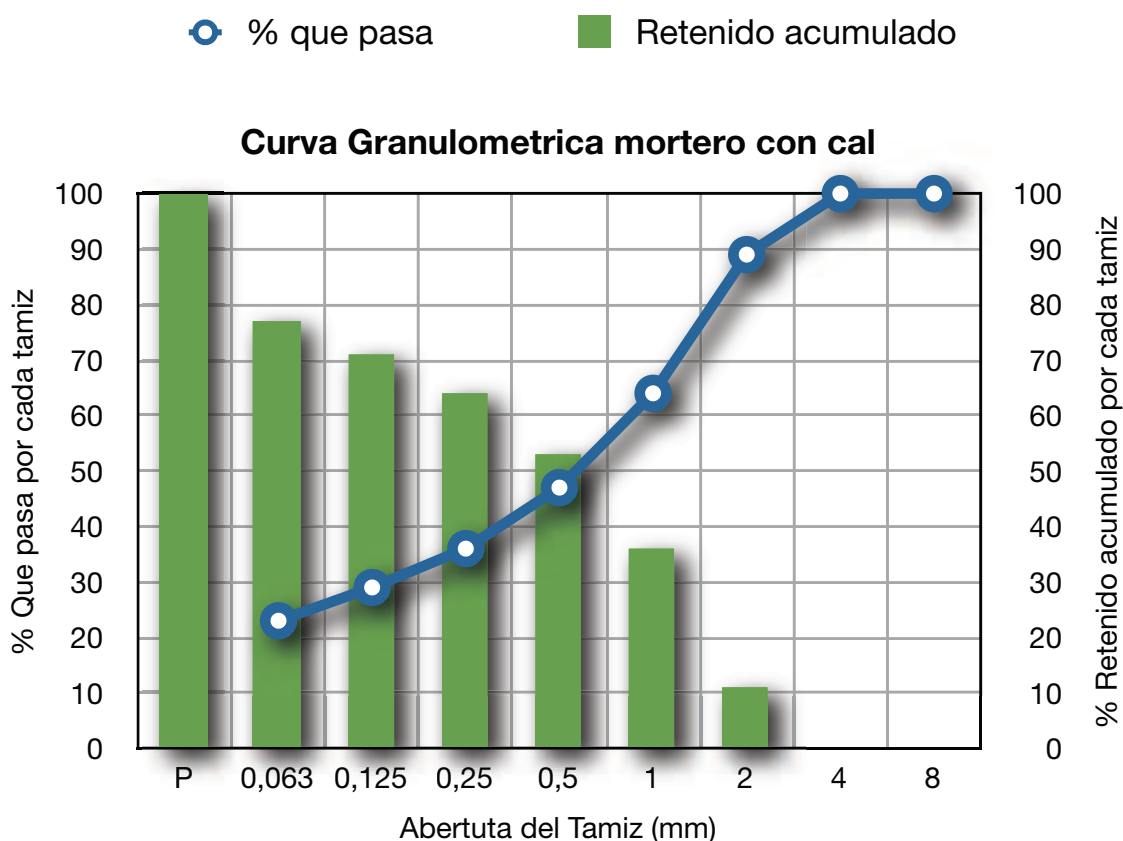
Estos resultados nos muestran que el mortero de Promsa sin cal tiene un contenido de filler del 26%, y un 74% de Partículas con tamaño  $>0,063$  mm. El resultado es razonable pues en la fracción filler se encuentran además de los finos del árido también la fracción cemento (conglomerante) y adiciones.

## Mortero Promsa con cal

En la *tabla 15*, se muestran los resultados de la granulometría del mortero de Promsa con cal, así como en la *gráfica 6* su curva granulométrica:

Tamaño de abertura del tamiz mm	Nombre del tamiz	Masa del material retenido (Ri) gr	Porcentaje del material retenido $Ri/M1 \times 100$	Porcentaje del material retenido acumulado	Porcentajes acumulados que pasan $100-(Ri/M1 \times 100)$
8	R1	0	0	0	100
4	R2	0	0	0	100
2	R3	39,95	12	12	89
1	R4	89,95	25	36	64
0,5	R5	62,6	18	54	46
0,25	R6	39,8	11	65	35
0,125	R7	23,8	7	71	29
0,063	R8	22,35	6	77	23
Bandeja de fondo	P	83,35	23	100	0

**Tabla 15:** Granulometría del mortero Promsa con cal



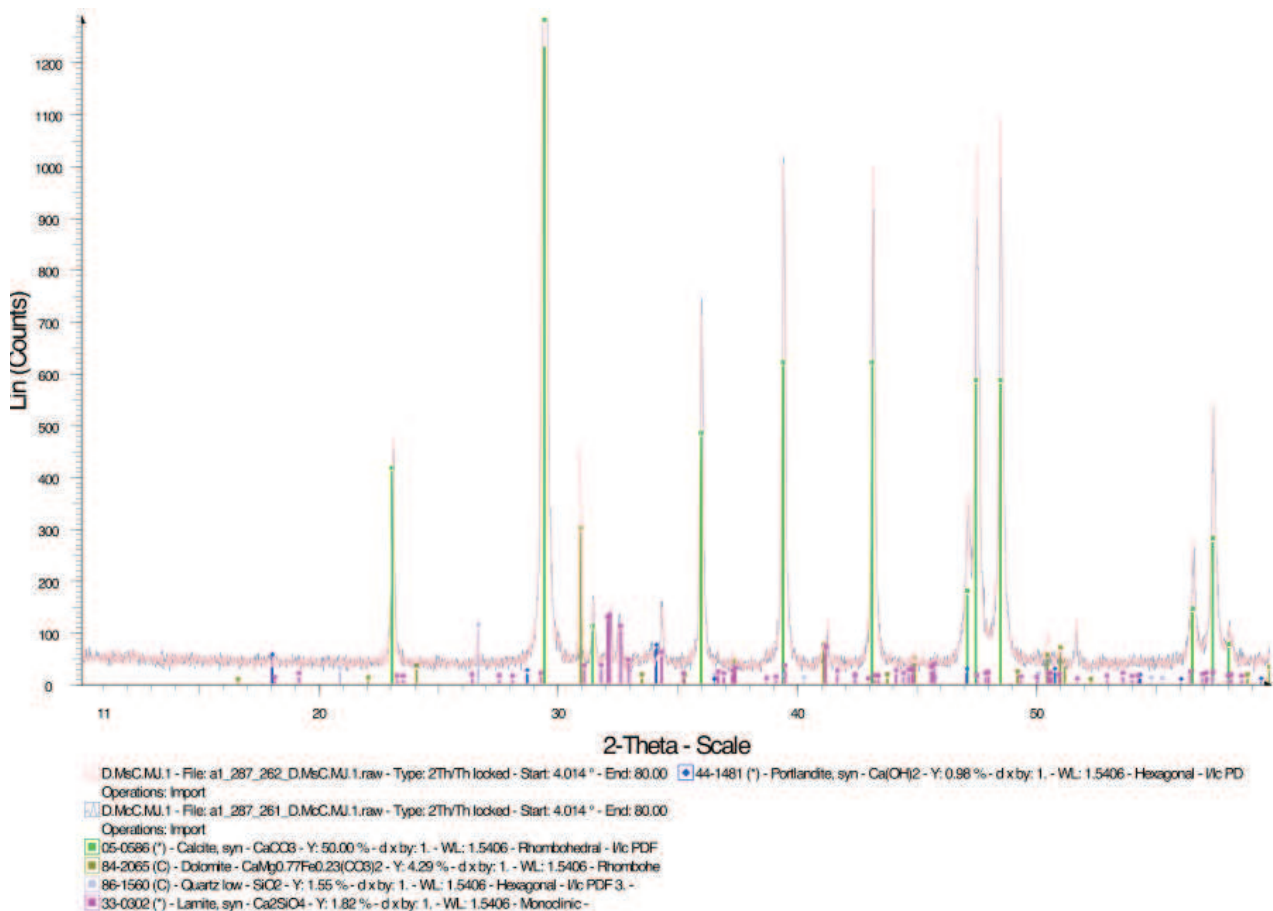
**Gráfica 6:** Curva granulométrica del mortero Promsa con cal

En estos resultados, se puede ver que la cantidad de finos que contiene el mortero de Promsa con cal no difiere mucho con el contenido de filler del mortero sin cal, teniendo

tan solo una diferencia de un 4% mas de filler en el mortero sin cal, lo que significa que en este mortero hay un mayor contenido de cemento.

### 5.1.3.2 Difracción de Rayos X

Para la caracterización mineralógica de los materiales, se realizo un análisis por la técnica de difracción de rayos X, por lo tanto el difractograma resultante del mortero sin cal se muestra en la *figura20*:



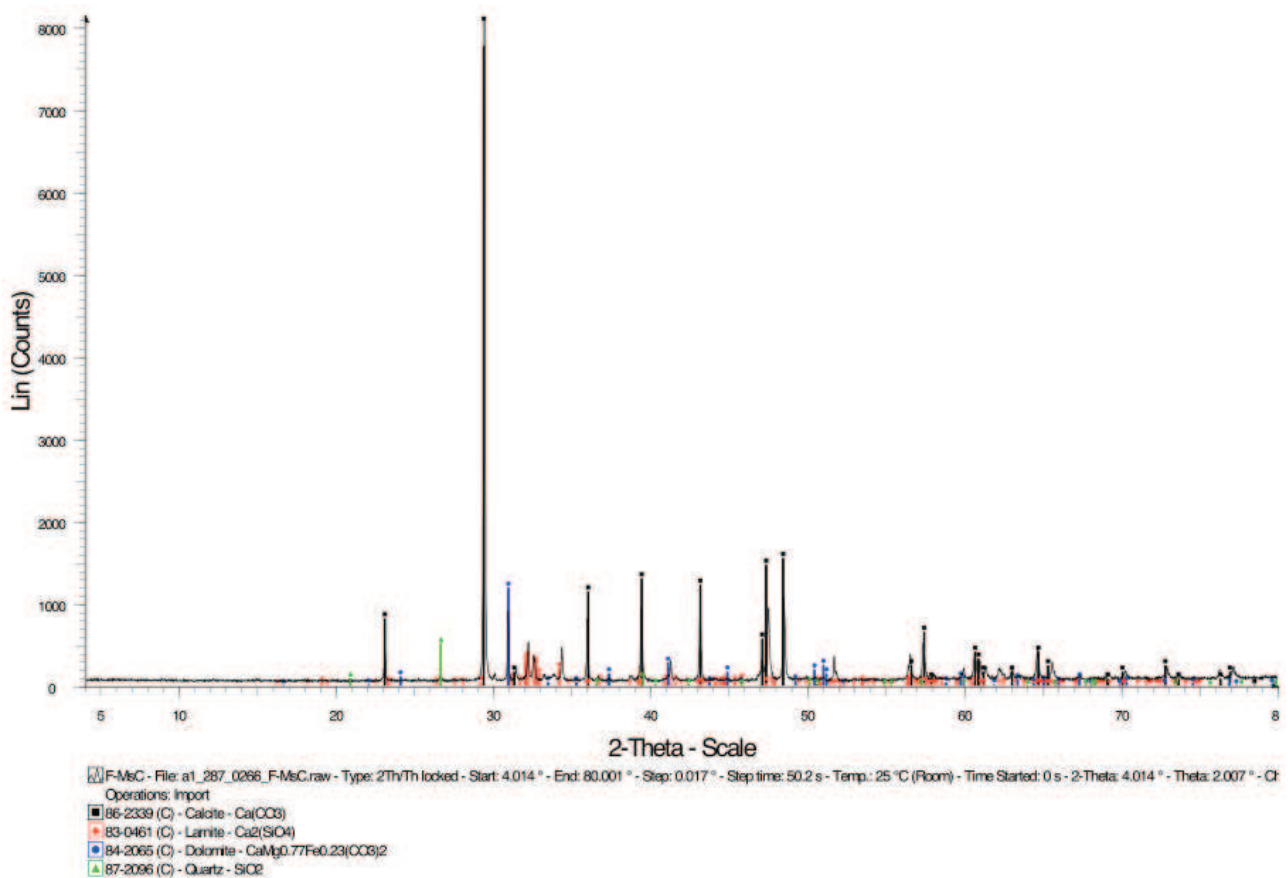
**Fig. 20:** Difractograma del mortero Promsa sin cal

En estos resultados se puede observar que el árido que compone al mortero promsa sin cal, es un árido calizo.

Con el objetivo de identificar los conglomerantes presentes en este mortero, se separa por tamizado la fracción inferior a 0,063 mm y se analiza la composición mineralógica por medio de la técnica de difracción de rayos X.

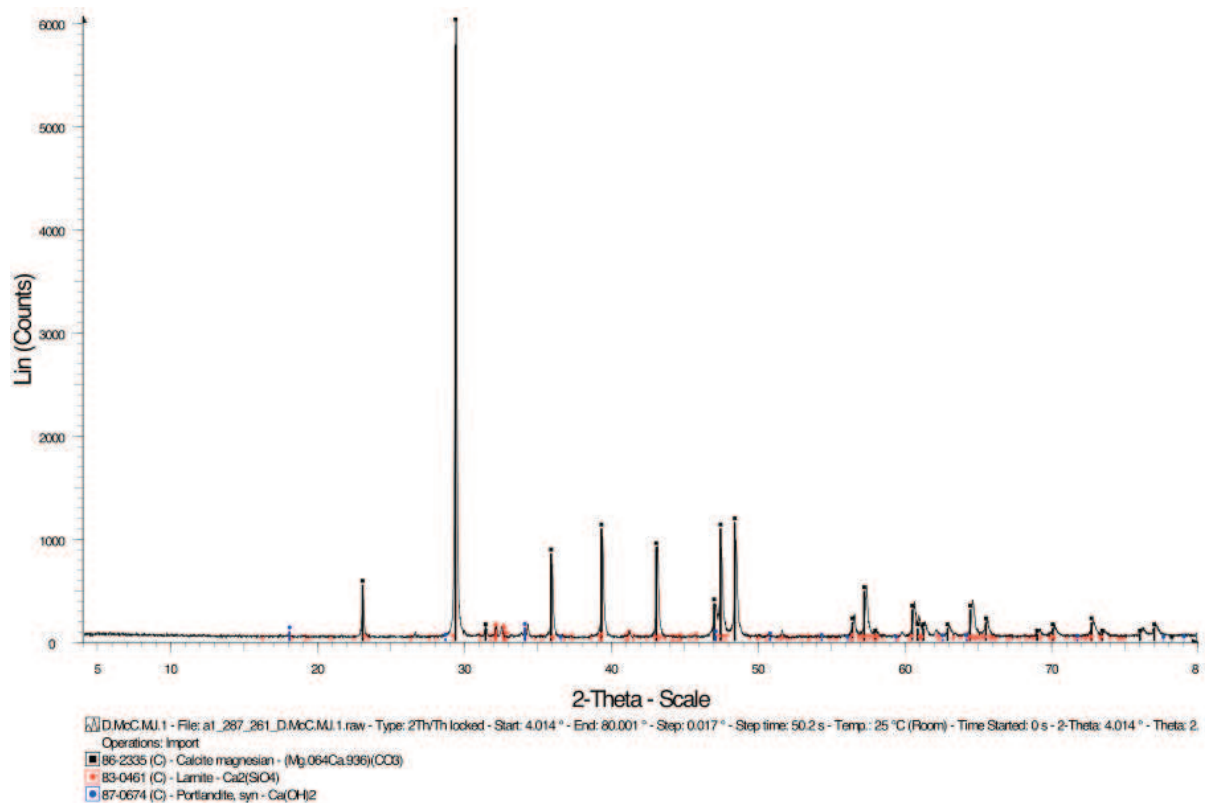
La *figura 21*, nos muestra el difractograma obtenido del análisis del filler del mortero sin cal, en el se puede observar la presencia mayoritaria de calcita, larnita, dolimita y cuarzo, los cuales nos muestra la presencia del cemento.





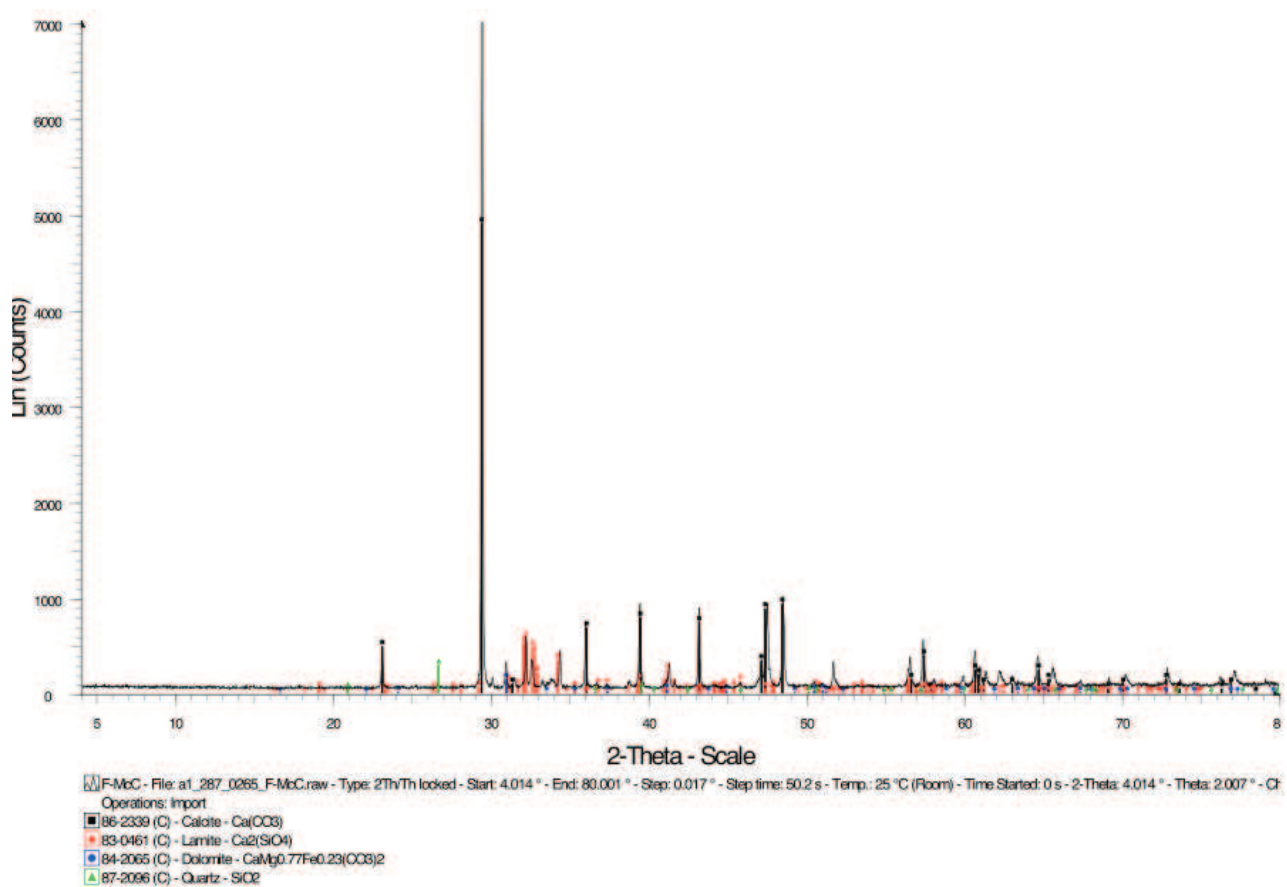
**Fig. 21:** Difracción de Rayos X filler mortero sin cal

El siguiente difractograma representado en la *figura 22*, corresponde al mortero Promsa con cal



**Fig. 22:** Difractograma del mortero Promsa con cal

Al igual que en el mortero sin cal, en el mortero con cal también se ha separado la fracción filler por medio de tamizado para ser analizado por medio de la técnica de DRX, el difractograma obtenido se muestra en la *figura 23*:



En la *tabla 16* se presenta la interpretación del análisis de los morteros comerciales con cal y sin cal, así como su fracción mas fina que se ha tamizado por el tamiz de 0,063 mm.

Composición mineral	Mortero con cal	Mortero sin cal	Filler Mortero con cal	Filler Mortero sin cal
Calcita	XX	XX	XX	XX
C2S	X	X	X	X
CH	i			
Dolomita		X	X	X
Cuarzo		i	i	X

**Tabla 16:** Resultados de DRX en morteros Promsa con cal y sin cal

Esta tabla nos muestra de manera mas clara, que el árido en todos los casos, es un árido o filler calizo.

En el mortero comercial con cal y en la fracción filler de este mortero no se detectan las fases anhidras o bien hidratadas de la cal demostrando que la adición de cal debe ser muy pequeña y por lo tanto no se detecta con la técnica utilizada (DRX).

Obviamente donde si se detectan fases anhidras del cemento es en el producto comercial: mortero con cal y sin cal, o bien en la fracción filler de los morteros con cal y sin cal.

### 5.1.3.2 Fluorescencia de Rayos X

Los resultados de la composición química elemental determinada por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) de los morteros comerciales Promsa con cal y sin cal, así como de su filler se muestran en la *tabla 17*:

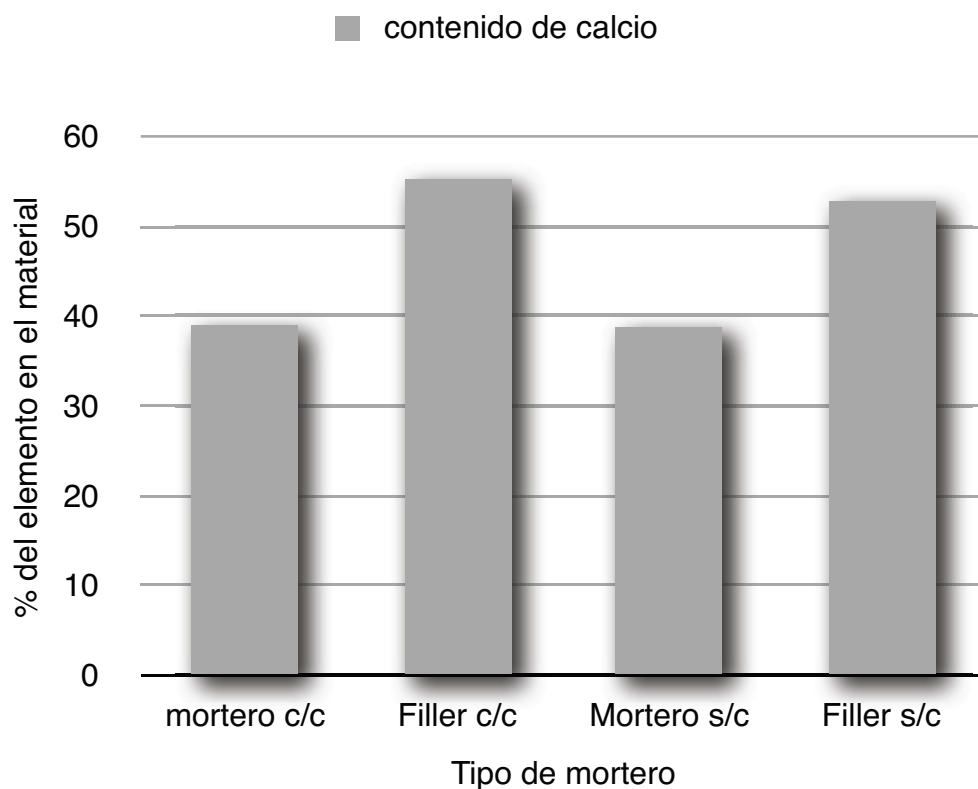
	Mortero con cal	Filler mortero con cal	Mortero sin cal	Filler mortero sin cal
<b>Mg</b>	0,50	0,90	0,69	1,12
<b>Al</b>	0,52	1,55	0,53	1,93
<b>Si</b>	1,32	4,43	1,31	4,68
<b>S</b>	0,16	0,60	0,15	0,52
<b>K</b>	0,11	0,26	0,09	0,32
<b>Ca</b>	38,95	55,22	38,77	52,82
<b>Ti</b>	0,00	0,10	0,02	0,10
<b>Fe</b>	0,45	1,41	0,46	1,75
<b>Sr</b>	0,04	0,06	0,03	0,04
<b>Ba</b>	0,24	0,26	0,30	0,35
<b>C</b>	10,74	1,21	10,71	1,56
<b>O</b>	46,97	33,98	46,93	34,80

**Tabla 17:** FRX en morteros Promsa con cal y sin cal

El mayor contenido de calcio determinado en el filler es debido a que en la fracción fina, tenemos concentrado todo el conglomerante además de la fracción fina del árido.

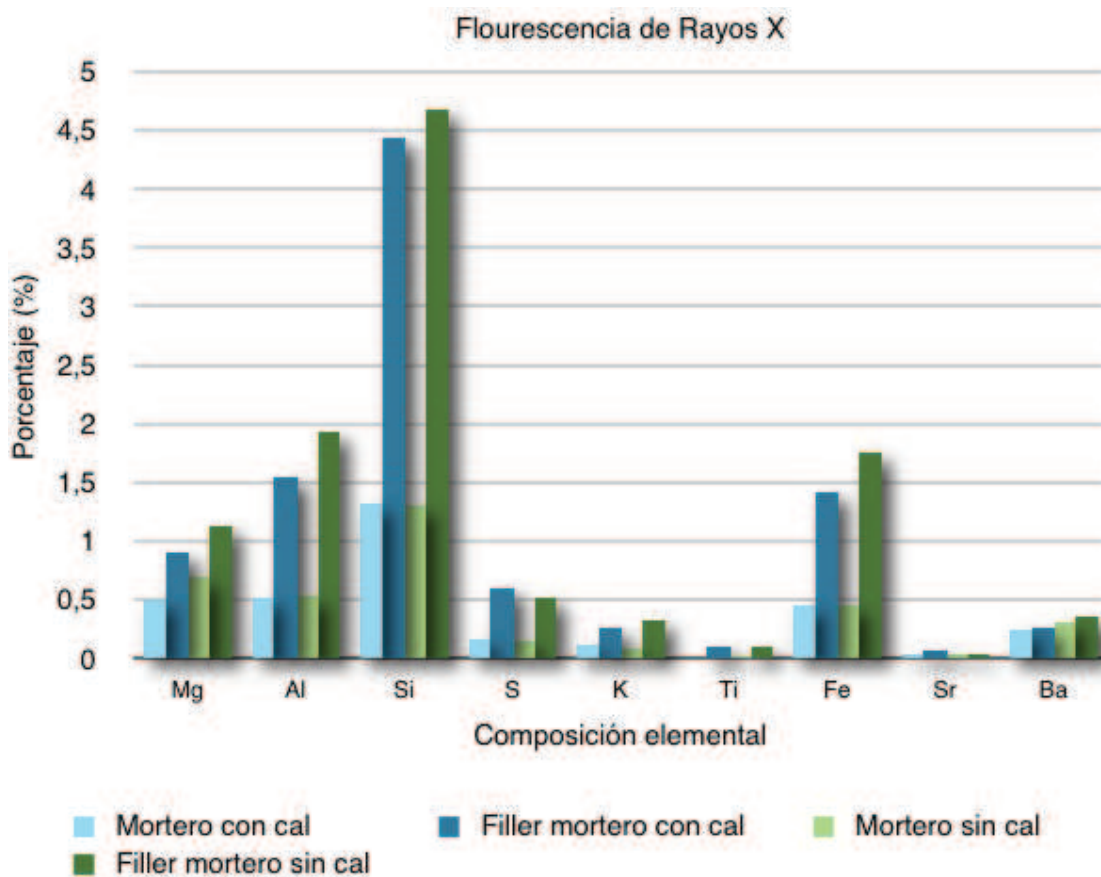
Por lo tanto, el contenido de calcio es debido a la suma del calcio de la calcita (árido) y el calcio de los silicatos de calcio y/o hidróxido de calcio (de los conglomerantes).

La *gráfica 6* nos muestra el contenido de calcio que tienen los morteros con cal y sin cal y en su respectivo filler:



**Gráfica 6:** Contenido de calcio en morteros comerciales

La *gráfica 7* nos representa los resultados de la fluorescencia de los elementos principales de cada tipo de mortero así como en su respectivo filler:



**Gráfica 7:** Fluorescencia de Rayos X de los morteros comerciales

Los aumentos de los contenidos de silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe) y azufre (S) observados en las muestras de filleres son debido a que todo el cemento está concentrado en esta fracción.

Así mismo se observa que el filler del mortero sin cal presenta mayores contenidos de Si, Al, Fe y S que el filler del mortero con cal. Esto demuestra que el mortero sin cal tiene un mayor contenido de cemento.

## 5.2 Estudio de morteros

### 5.2.1 Dosificación de morteros

Para determinar la dosificación de los morteros, nos basamos en las granulometrías, tanto del árido reciclado como de los morteros comerciales (Promsa), así, se trato de ajustar la curva granulometrica del árido reciclado a la del mortero convencional.

#### 5.2.1.1 Dosificación de Morteros sin cal

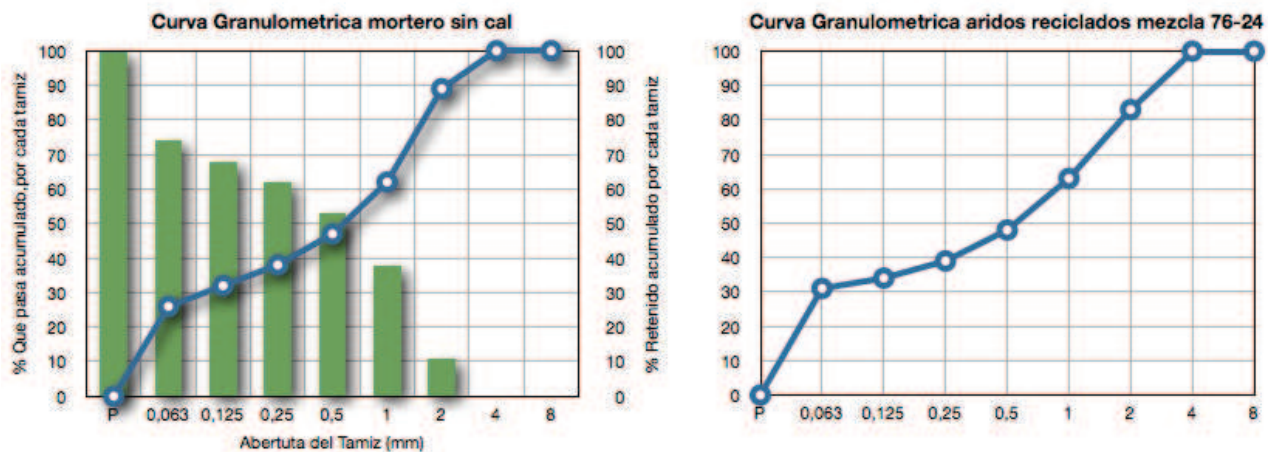
Como se ha explicado anteriormente, la curva granulometrica del árido reciclado, se ha ajustado en esta caso a la curva del mortero sin cal, se hicieron varias mezclas de diferentes porcentajes de árido >63mm y de filler, hasta encontrar la que menos diferencia presentaba con respecto a los valores del mortero sin cal.

En este caso, la mezcla que resulto ser la mas optima fue la que tenia un porcentaje de 76% de áridos >63 mm y un 24% de filler, es decir de áridos <63 mm, dicha mezcla se muestra en la *tabla 18*:

Tamaño de abertura del tamiz mm	%acumu que pasan árido rec	X1 Arido >63 mm	X2 Filler <63 mm	Mezcla 76-24	Diferencia	Mezcla mortero sin cal
8	100	76	24	100	0	100
4	100	76	24	100	-0	100
2	78	59	24	83	-6	89
1	51	39	24	63	1	62
0,5	31	24	24	48	1	47
0,25	19	15	24	39	1	38
0,125	13	10	24	34	2	32
0,063	9	7	24	31	5	26

**Tabla 18:** Granulometría del árido reciclado adaptada a la mezcla 76-24

Para una mejor comparación, en la *gráfica 8* se muestra la curva granulometrica del mortero sin cal y la curva de la mezcla 74-26 :



**Grafica 8:** Curva granulometrica del árido reciclado mezcla 74-24

A continuación se muestra el procedimiento que se llevo a cabo para la dosificación de los morteros sin cal:

Datos:

- \* Densidad árido convencional ( $d_c$ )= 2,644 gr/cm<sup>3</sup>
- \* Densidad árido reciclado ( $d_r$ )= 2,179 gr/gr/cm<sup>3</sup>
- \* Absorción de agua árido convencional= 0,685%
- \* Absorción de agua árido reciclado= 9,1%
- \* MR= Masa mortero reciclado
- \* mr= masa árido reciclado >63 mm
- \* fr= masa filler árido reciclado <63 mm

Nota: Por la granulometría del mortero de Promsa sin cal, podemos saber que:

26,5% < 63 mm (filler)

73,5% > 63 mm

Por lo tanto:

$$f_c = (2000 \text{ gr} * 26,5) / 100 = 539 \text{ gr}$$

$$m_c = (2000 \text{ gr} * 73,5) / 100 = 1470 \text{ gr}$$

Nota: Adoptaremos que :  $f_c = f_r$

$$V_{MR} = V_{MC}$$

Por lo tanto:

$$v = m/d \rightarrow m_r/d_r = m_c/d_c \rightarrow \mathbf{m_r = m_c/d_c * (d_r)}$$

$$mr = 1470 \text{ gr} / 2,644 \text{ gr/cm}^3 * (2,179 \text{ gr/cm}^3) = 1211,47 \text{ gr}$$

Nota: Por granulometría de los áridos reciclados podemos saber que:

9% < 63 mm (filler)

91% > 63 mm

Por lo tanto:

$$mr = 0,91 * AR \rightarrow AR = mr / 0,91 \rightarrow 1211,47 \text{ gr} / 0,91 = \mathbf{1331,28 \text{ gr}}$$

Nota: Para la mezcla del árido reciclado + fiiller que tiene granulometría similar a la del mortero sin cal, tenemos la mas optima de 76% >63 mm y 24% <63mm, por lo tanto:

$$\text{filler} = 1331,28 \text{ gr} * (24) / 76 = 420,40 \text{ gr}$$

\* filler de adición = Filler calizo + cemento

Con una relación a/c=1 tenemos:

$$\text{filler calizo} = 420,40 - 260 \text{ (cemento)} = 160,4 \text{ gr}$$

Nota: Se opto por añadir 280 gr de cemento a los morteros sin cal.

Una vez obtenidos los datos, se prosigue a añadir al árido el agua de absorción, que en el caso del árido reciclado en el 9,1%, para tener el árido en estado saturado con superficie seca, esto se hace para que el árido no absorba el agua de amasado.

$$(1331,28 * 9,1\%) / 100 = 121,14 \text{ gr (agua)}$$

$$1331,28 + 121,14 = 1452,2 \text{ gr (árido reciclado saturado)}$$

Así pues tenemos que para el mortero MR100 s/c el cual es el mortero con un porcentaje de árido reciclado del 100%, la siguiente dosificación:

**Arido reciclado (saturado) = 1452,2 gr**

**Cemento = 280**

**Agua= 260 ml**

En la *tabla 19* se muestran todas las dosificaciones de los morteros sin cal, basadas en el procedimiento anterior:

Tipo de mortero	Arido rec (gr)	Arido conv (gr)	Cemento (gr)	Masa total sin agua (gr)	Agua (ml)
MR100 s/c	1452,2	0,0	280	1732,2	260
MR75 s/c	1085,1	432,9	280	1798	260
MR50 s/c	726,1	865,9	280	1872	260
MR25 s/c	363,0	1298,8	280	1941,8	260
MR0 s/c	0,0	1731,8	280	2011,8	260
Promsa sin cal	0,0	2000,0	-	2000	260

**Tabla 19:** Dosificación de los morteros sin cal

### 5.2.1.2 Dosificación de Morteros con cal

La *tabla 20* nos muestra la dosificación adoptada para la fabricación de los morteros con cal :

Tipo de mortero	Arido rec (gr)	Arido conv (gr)	Cemento (gr)	Masa sin agua (gr)	Masa total sin agua (gr)	Agua (ml)
MR100 cal 0,5	1452,2	0,0	140	140	1732,2	265
MR100 cal 0,25	1452,2	0,0	210	70	1732,2	265
MR25 cal 0,5	363,0	1298,8	140	140	1941,8	265
MR25 cal 0,25	363,0	1298,8	210	70	1941,8	265
Promsa con cal	0,0	2000	-	-	2000	265

**Tabla 20:** Dosificación de los morteros con cal

## 5.2.2 Propiedades de los morteros en estado fresco

### 5.2.2.1 Consistencia

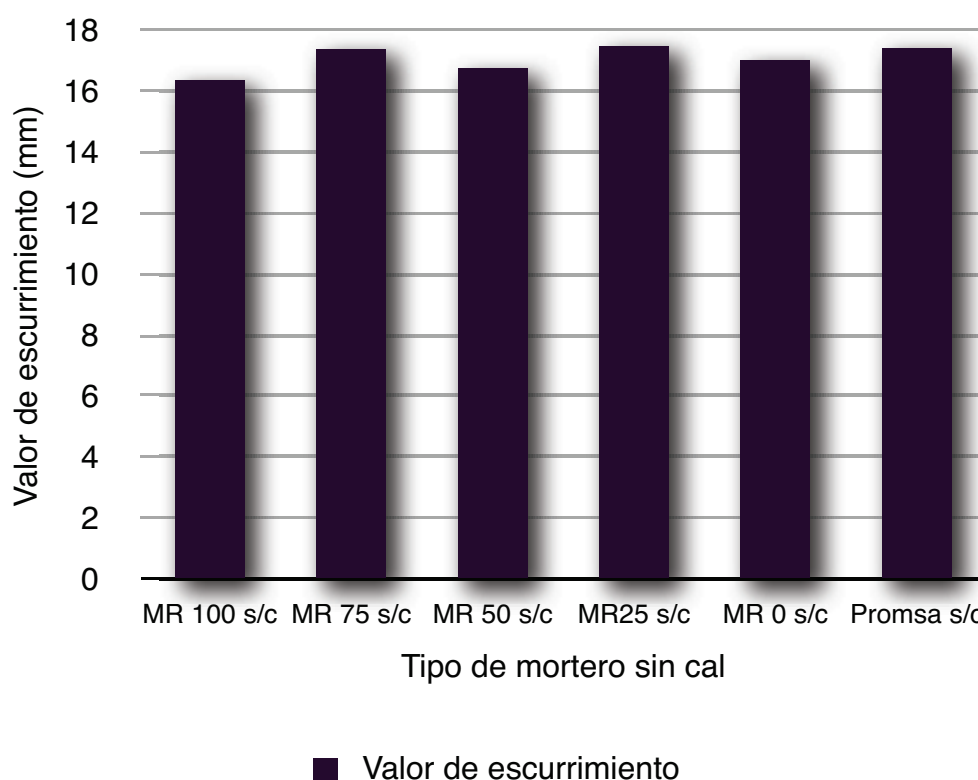
Los valores de la consistencia obtenidos para los morteros sin cal, se muestran en la *tabla 21*:



Tipo de mortero sin cal	Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Valor de escurrimiento
MR 100 s/c	163	164	164
MR 75 s/c	177	170	174
MR 50 s/c	152	182	167
MR 25 s/c	176	173	175
MR 0 s/C	167	172	170
Mortero Promsa s/c	174	174	174

**Tabla 21:** Valor de escurrimiento de los morteros sin cal

Según la norma UNE-EN 1015-3 Los valores de escurrimiento de un mortero plástico están comprendidos entre 140mm y 200mm; en todos los casos, los valores de consistencia obtenidos en los morteros tanto reciclados como de referencia sin cal, se encuentran dentro de estos valores. Se puede concluir que los áridos reciclados no influyen en esta propiedad, la *gráfica 9* nos muestra los valores de escurrimiento de los morteros sin cal con el fin de tener una mejor apreciación de estos datos:



**Gráfica 9:** valor de escurrimiento de los morteros sin cal

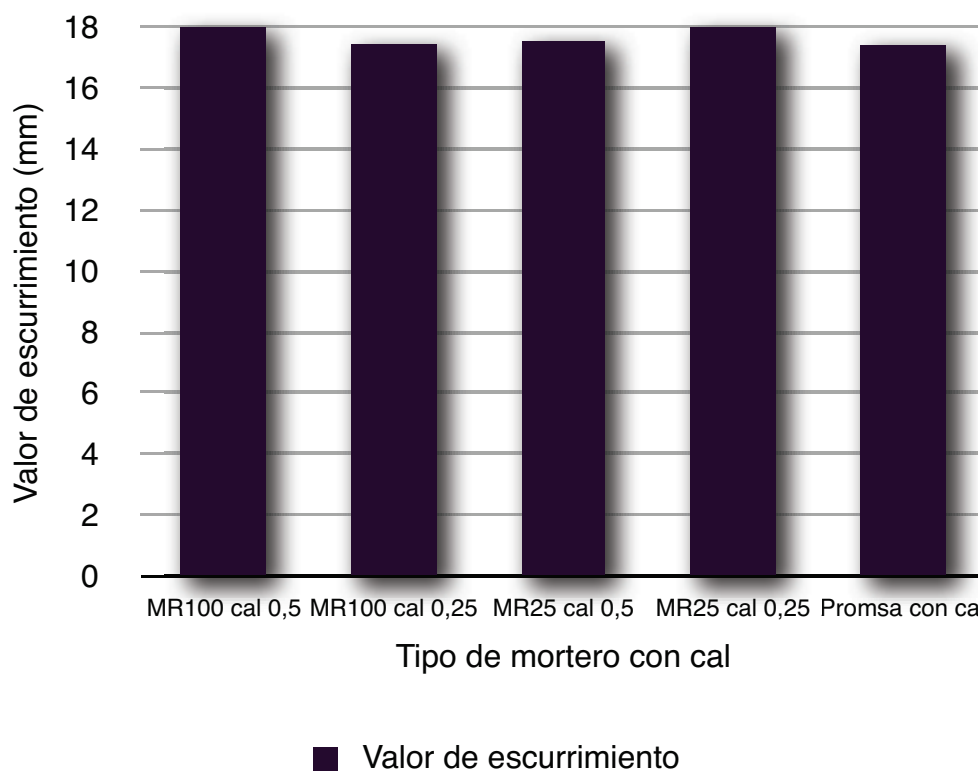
Una vez analizada la consistencia de los morteros sin cal, se procede a analizar esta misma propiedad en los morteros con cal, para ver la influencia que tiene en esta

propiedad de los morteros en estado fresco. La *tabla 22* nos muestra los valores de escurrimiento obtenidos de los morteros con cal:

Tipo de mortero sin cal	Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Valor de escurrimiento
MR100 cal 0,5	181	182	182
MR100 cal 0,25	171	177	174
MR25 cal 0,5	172	182	177
MR25 cal 0,25	189	187	188
Mortero Promsa con cal	174	174	174

**Tabla 22:** Valor de escurrimiento de los morteros con cal

En los resultados obtenidos se puede observar lo mismo que en los morteros sin cal, el valor de escurrimiento en todos los casos, se encuentra dentro del rango que un mortero plástico debe tener. Además que con el mismo contenido de agua, se logran valores de escurrimiento similares, esto es debido a que se utilizaron los áridos en la condición de saturados con superficie seca, con el fin de que el árido reciclado debido a su alta absorción no absorba el agua de la mezcla. La *gráfica 10* nos muestra los valores de consistencia, para poder apreciar mejor que estos valores no varían mucho entre sí:



**Gráfica 10:** Valor de escurrimiento de los morteros con cal

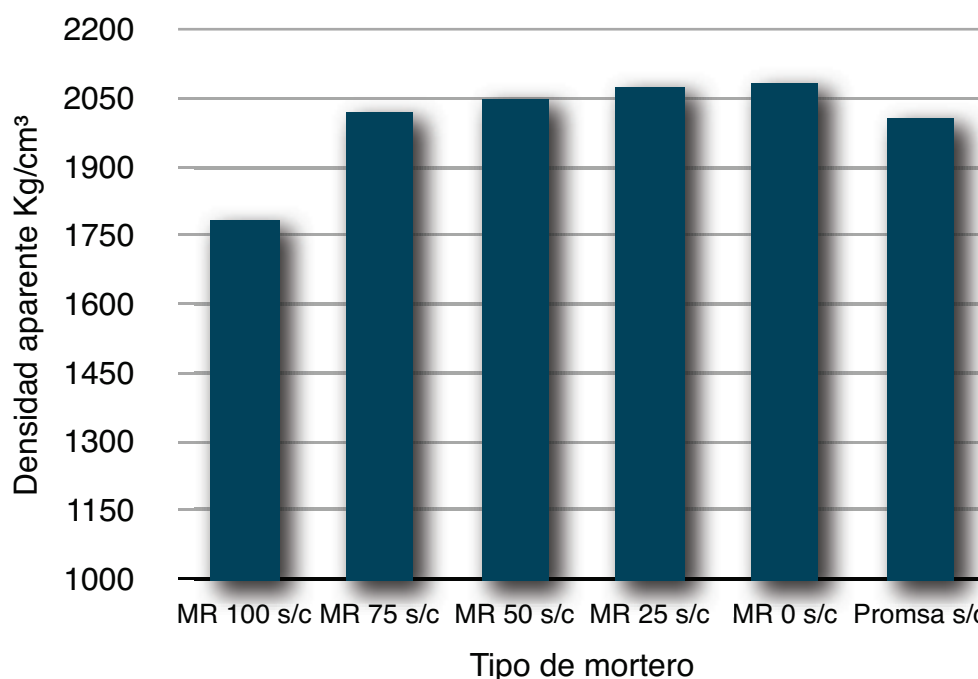
### 5.2.2.2 Densidad aparente

Los resultados obtenidos de la densidad aparente en estado fresco de los morteros sin cal según la norma UNE-EN 1015-6, se muestran en la *tabla 23*:

Tipo de mortero	Densidad aparente (Kg/m <sup>3</sup> )
MR 100 s/c	1783
MR 75 s/c	2019
MR 50 s/c	2049
MR 25 s/c	2075
MR 0 s/C	2083
Promsa s/c	2007

**Tabla 23:** Densidad aparente de los morteros sin cal

Para poder interpretar mas fácilmente los resultados, a continuación se representan estos datos en la *gráfica 11*:



**Gráfica 11:** Densidad aparente en los morteros sin cal

En la densidad aparente de los morteros sin cal, se puede observar claramente que a medida que aumenta el contenido de árido reciclado, el mortero presenta menor

densidad, esto es porque los áridos reciclados tienen menor densidad que los áridos convencionales debido a la pasta de mortero que tienen adherida a su superficie.

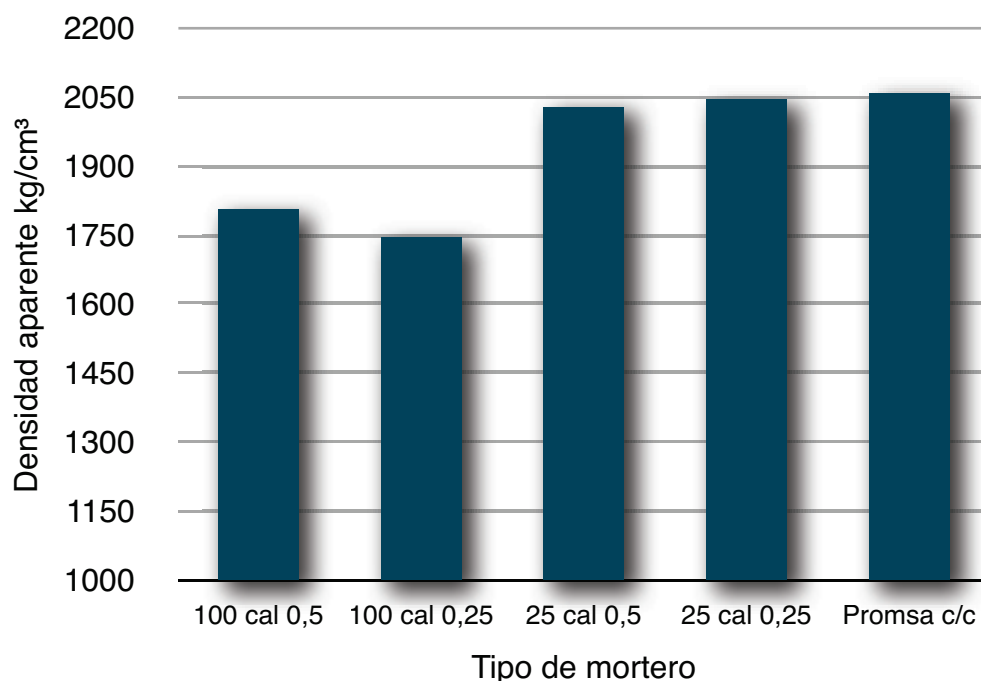
En este caso, el mortero que mas se asemeja a la densidad que presenta el mortero de referencia (Promsa s/c), es el mortero con un contenido de 25% de árido reciclado, es decir, el mortero MR25 s/c.

Una vez analizados los valores de densidad de los morteros sin cal, se procede a discutir la densidad aparente de los morteros con cal, los datos obtenidos se presentan en la *tabla 24*:

Tipo de mortero	Densidad aparente (Kg/m <sup>3</sup> )
MR100 cal 0,5	1805
MR100 cal 0,25	1746
MR25 cal 0,5	2029
MR25 cal 0,25	2044
Mortero Promsa con cal	2059

**Tabla 24:** Densidad aparente en los morteros con cal

Para poder interpretar mas fácilmente los resultados, a continuación se representan estos datos en la *gráfica 12*:



**Gráfica 12:** Densidad aparente en los morteros con cal

Analizando los morteros MR100 cal 0,5 y MR100 cal 0,25, cuyo contenido de áridos es el 100%, se puede observar que estos son mas ligeros que aquellos cuyo contenido de árido reciclado es menor o nulo, estos resultados coinciden con la parte teórica de que los áridos reciclados presentan una menor densidad debido a la pasta de mortero adherida a su superficie.

La densidad aparente que presenta el mortero MR25 cal 0,25, es la que mas se asemeja al valor de la densidad del mortero de Promsa, es decir, al mortero de referencia, presentando solo una diferencia de 14,85 kg/m<sup>3</sup>.

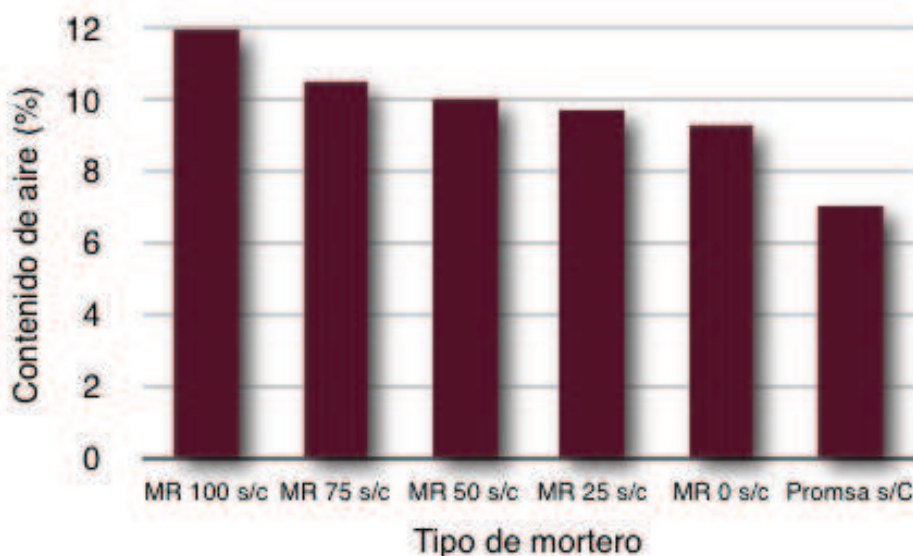
### 5.2.2.3 Contenido de aire

Los resultados obtenidos del contenido de aire en los morteros sin cal, se muestran en la *tabla 25*:

Tipo de mortero	Contenido de aire (%)
MR100 s/c	12
MR75 s/c	10,5
MR50 s/c	10
MR25 s/c	9,7
MR0 s/C	9,3
Mortero s/c de Promsa	7

**Tabla 25:** Contenido de aire en los morteros sin cal

La *gráfica 13* ilustra el contenido de aire en los morteros sin cal, para poder apreciar mejor esta propiedad:



**Gráfica 13:** Contenido de aire en morteros sin cal

En este ensayo, se puede observar claramente que a mayor contenido de árido reciclado, mayor es el contenido de aire ocluido en el mortero, esto se debe a que el árido reciclado es mas poroso debido a la pasta de cemento que tiene adherido en su superficie.

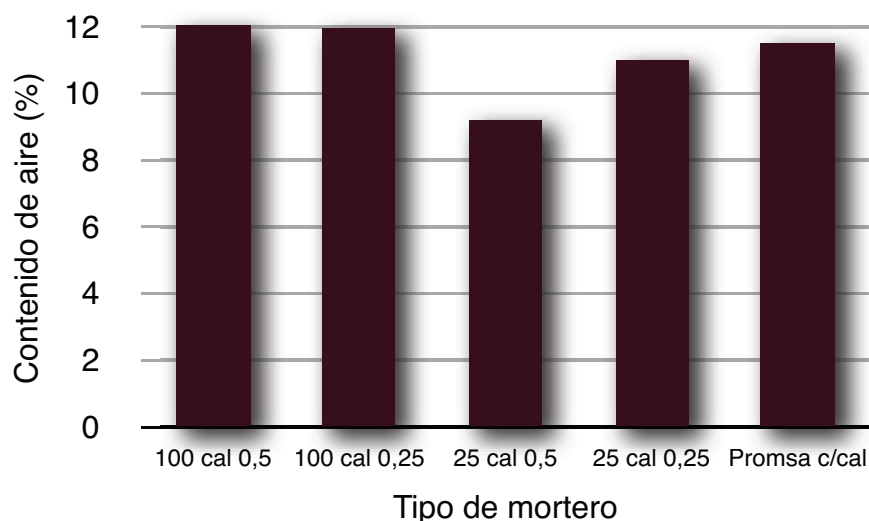
A mayor contenido de aire en un mortero, menor será su resistencia a compresión, por otra parte, el aire ocluido mejorara otras propiedades como su trabajabilidad.

La *tabla 26* muestra los resultados obtenidos de este ensayo correspondientes a los morteros con cal:

Tipo de mortero	Contenido de aire (%)
MR100 cal 0,5	12,5
MR100 cal 0,25	12,0
MR25 cal 0,5	9,2
MR25 cal 0,25	11,0
Mortero Promsa con cal	11,5

**Tabla 26:** Contenido de aire en los morteros con cal

La *gráfica 14* ilustra el contenido de aire en los morteros sin cal, para poder apreciar mejor esta propiedad:



**Gráfica 14:** Contenido de aire en los morteros con cal

En los resultados del contenido de aire en los morteros con cal se observan dos tendencias:

1.-Para los morteros con sustitución del 100% por árido fino reciclado tanto con un 0,5 y 0,25 de cal presentan el mismo porcentaje de contenido de aire, por el consiguiente

en este caso el contenido de aire viene gobernado por la alta cantidad de la sustitución y no por la proporción de cal en la fracción conglomerante.

2.-En cambio en los morteros MR25 cal 0,5 y MR25 cal 0,25 ambos con una sustitución de 25% de árido convencional por árido reciclados difieren notoriamente en su contenido de aire, siendo menor con menos proporción de cal en la fracción conglomerante.

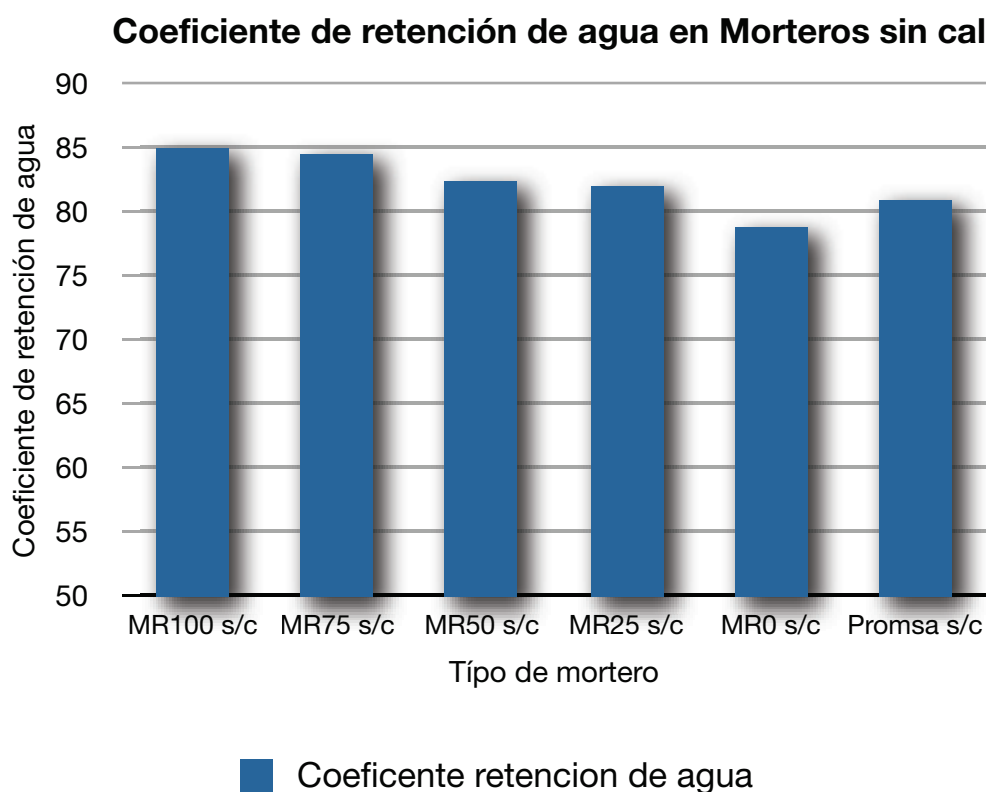
En estos resultados podemos afirmar que cuanto mas árido reciclado fino hay en el mortero más contenido de aire, en cambio en los morteros de menor proporción de árido fino reciclado (25%) quien induce a un mayor o menor contenido de aire es la proporción de cal.

#### 5.2.2.4 Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua determinada en los morteros sin cal, se muestra a continuación tanto en la *tabla 27* como en la *gráfica 15* para una mejor comprensión:

Tipo de Mortero	Masa Total (gr)	Cantidad de agua total (ml)	Molde + gasas+ 8 filtros (gr)	Molde + Mortero (gr)	Cantidad de agua en el molde (ml)	8 filtros + agua absorbida 5min (gr)	Cantidad de agua absorbida (ml)	Capacida d de retencion de agua (%)	Media (%)
MR100 sc									
Muestra 1	1732,2	260	47,7	559,9	76,88	20,6	11,8	84,65	84,94
Muestra 2	1732,2	260	47,7	557,3	76,49	20,1	11,3	85,23	
MR75 s/c									
Muestra 1	1798,1	260	47,7	595,7	79,24	21,3	12,5	84,22	84,48
Muestra 2	1798,1	260	47,7	591,7	78,66	20,8	12	84,74	
MR50 s/c									
Muestra 1	1872,0	260	47,7	607,0	77,68	22,1	13,3	82,88	82,33
Muestra 2	1872,0	260	47,7	597,0	76,29	22,7	13,9	81,78	
MR25 s/c									
Muestra 1	1941,9	260	47,7	618,5	76,42	23,3	14,5	81,03	81,99
Muestra 2	1941,9	260	47,7	630,1	77,98	22,1	13,3	82,94	
MR0 s/c									
Muestra 1	2011,8	260	47,7	684,5	82,30	26,9	18,1	78,01	78,73
Muestra 2	2011,8	260	47,7	680,6	81,79	25,6	16,8	79,46	
Proms sc									
Muestra 1	2000,0	260	47,7	656,3	79,12	24,3	15,5	80,41	81,35
Muestra 2	2000,0	260	47,7	651,8	78,53	22,7	13,9	82,30	

**Tabla 27:** Capacidad de retención de agua en morteros sin cal



**Gráfica 15:** Capacidad de retención de agua en morteros sin cal

La capacidad de retención de agua que presentan los morteros sin cal fabricados, va aumentando conforme aumenta el contenido de áridos reciclados, esto también se debe a la pasta de mortero adherida, a mayor cantidad de mortero adherido en la superficie de los áridos, mayor será la capacidad de retención.

La capacidad de retención es una propiedad muy importante en cuanto a la trabajabilidad del mortero, y esta característica se ve claramente favorecida cuando aumentamos el contenido de árido reciclado.

También es importante saber que esta propiedad influye en las resistencias mecánicas de los morteros, ya que si el mortero no tiene la capacidad de retención, las partículas del conglomerante no podrán ser hidratadas correctamente.

La capacidad de retención de agua del mortero MR25 s/c es superior a la del mortero MR0 s/c y ligeramente superior a la del mortero Promsa s/c.

Una vez analizado los resultados de la capacidad de agua de los morteros sin cal, se procederán los resultados obtenidos de este ensayo en los morteros con cal, los cuales se presentan en la *tabla 28*:



Tipo de Mortero	Masa Total (gr)	Cantidad de agua total (ml)	Molde + gasas+ 8 filtros (gr)	Molde + Mortero (gr)	Cantidad de agua en el molde (ml)	8 filtros + agua absorbida 5min (gr)	Cantidad de agua absorbida (ml)	Capacidad de retención de agua (%)	Media (%)
<b>MR100 cal 0,5</b>									
Muestra 1	1732,2	265	47,7	547,7	76,49	21,4	12,6	83,53	<b>83,98</b>
Muestra 2	1732,2	265	47,7	547,4	76,45	20,7	11,9	84,43	
<b>MR100 cal 0,25</b>									
Muestra 1	1732,2	265	47,7	547,1	76,40	19,1	10,3	86,52	<b>86,97</b>
Muestra 2	1732,2	265	47,7	546,9	76,37	18,4	9,6	87,43	
<b>MR25 cal 0,5</b>									
Muestra 1	1941,9	265	47,7	606,5	76,26	22,4	13,6	82,17	<b>82,48</b>
Muestra 2	1941,9	265	47,7	605,8	76,16	21,9	13,1	82,80	
<b>MR25 cal 0,25</b>									
Muestra 1	1941,9	265	47,7	594,1	74,56	19,7	10,9	85,38	<b>86,10</b>
Muestra 2	1941,9	265	47,7	592,5	74,35	18,6	9,8	86,82	
<b>Promsa con cal</b>									
Muestra 1	2000,0	265	47,7	585,9	71,31	20,3	11,5	83,87	<b>84,19</b>
Muestra 2	2000,0	265	47,7	578,8	70,37	19,7	10,9	84,51	

**Tabla 28:** Capacidad de retención de agua de los morteros con cal

En estos resultados se puede observar que los morteros cuyo contenido de árido reciclado es igual pero con mayor contenido de cemento, presentan mayor retención de agua.

Por otro lado, si tomamos en cuenta el porcentaje de contenido de árido reciclado, aquellos que presenta mayor cantidad e igual contenido de cemento como es el caso de los morteros MR100 cal 0,5 y MR25 cal 0,5, se puede observar un ligero aumento de esta capacidad.

Esta propiedad consiste en el poder de conservar el agua de amasado que posee el material ante solicitaciones externas (atmosféricas, absorción de las piezas, etc), por lo tanto una adecuada retención de agua permite mantener la plasticidad de la pasta para que las piezas puedan ser colocadas y niveladas, lo que se relaciona directamente con la trabajabilidad del mortero.

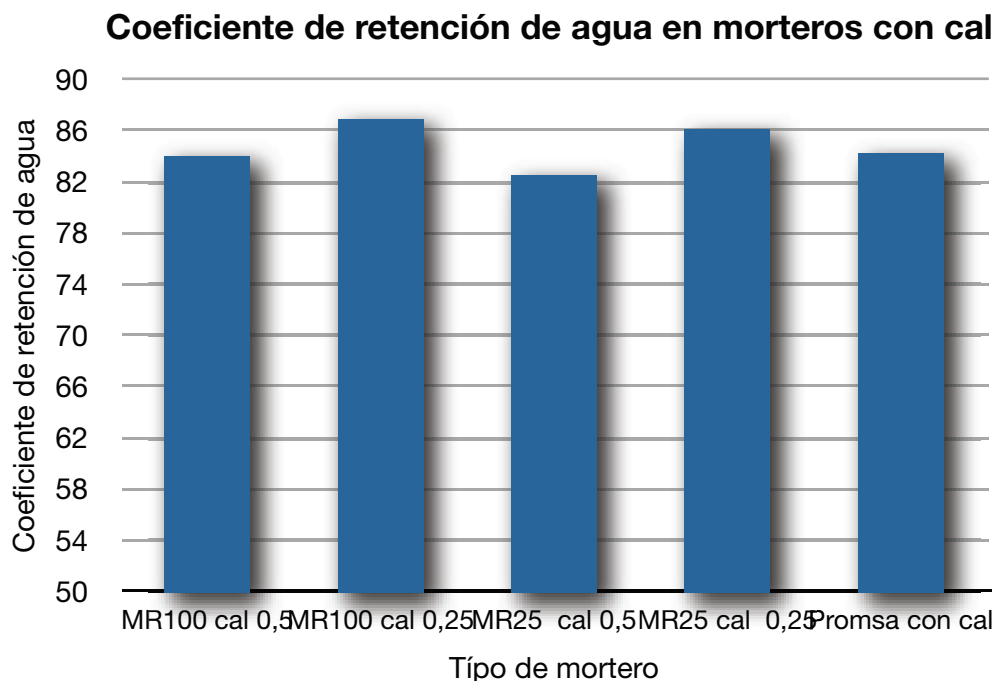
En la resistencia mecánica, la capacidad de retención también influye, ya que al ser baja, las partículas del cemento no podrán hidratarse correctamente, traduciendo esto a menores resistencias.

Esta propiedad también influye en la adherencia final del mortero con el soporte y en la permeabilidad del agua.

La capacidad de retención mejora mientras mas contenido de finos tenga la mezcla ya sea aumentando el contenido de finos, o el contenido y finura de sus conglomerantes

como del cemento o cal si es el caso, es por esto que los morteros con cal presentan valores de retención ligeramente superiores.

La *gráfica 16* nos muestra de forma gráfica los resultados de esta propiedad en los morteros con cal:



**Gráfica 16:** Capacidad de retención de agua de los morteros con cal

### 5.2.3 Propiedades del mortero en estado endurecido

#### 5.1.3.1 Densidad en seco y porosidad

La *tabla 29* recoge los datos obtenidos del ensayo de densidad en seco y porosidad de los morteros sin cal:

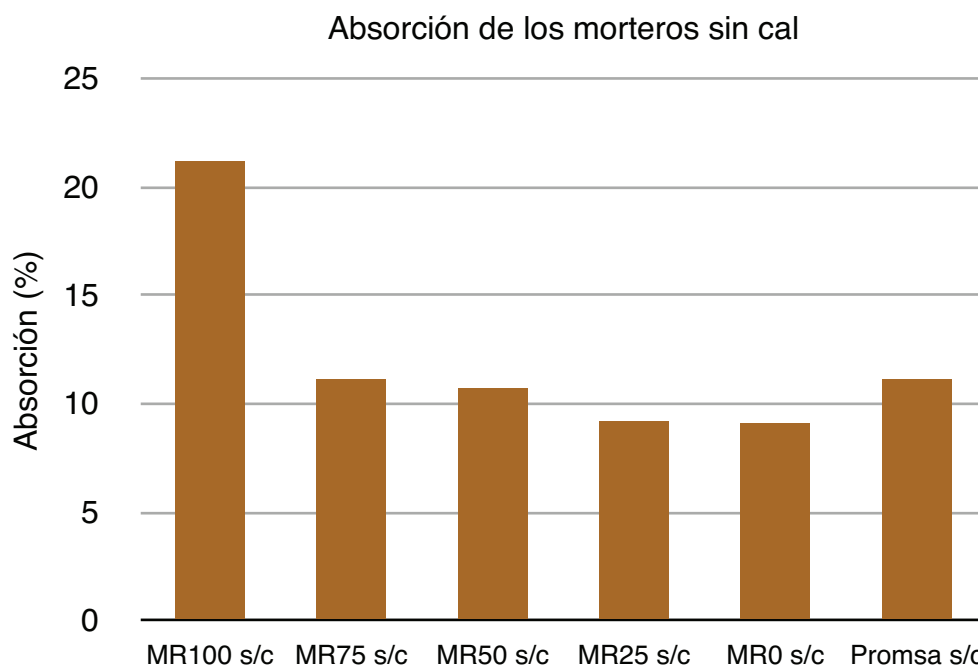
Muestra	M sss	M s	P sumergido	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad sss (kg/m <sup>3</sup> )	Absorción (%)	Porosidad
MR 100 s/c	229,2	189,1	108,4	1565	1897	21,2	33,2
MR 75 s/c	266,4	239,7	142,4	1933	2148	11,1	21,5
MR 50 s/c	270,8	244,6	146,6	1969	2180	10,7	21,1
MR 25 s/c	279,7	256,2	153,0	2022	2208	9,2	18,5
MR 0 s/c	279,0	255,8	153,1	2032	2216	9,1	18,4
Promsa s/c	260,3	234,2	138,4	1921	2135	11,1	21,4

**Tabla 29:** Densidad en seco y porosidad de los morteros sin cal

Estos resultados nos muestran que a mayor contenido de árido reciclado menor es la densidad en seco que presentan los morteros sin cal.

En cuanto a la porosidad se puede observar que es mayor a medida que aumenta el contenido de árido reciclado. Sin embargo el mortero Promsa s/c presenta una porosidad similar que la del mortero MR75 s/c.

La *gráfica 17* nos muestra los resultados de absorción de los morteros sin cal:



**Gráfica 17:** absorción de los morteros con cal

La absorción que presentan los morteros sin cal, es bastante elevada en el mortero MR100 s/c, disminuyendo casi un 50% en el mortero MR75 s/c, a partir de este, la absorción disminuye ligeramente a medida que disminuye el árido reciclado. Sin embargo la absorción del mortero Promsa s/c es igual que la del mortero con un 75% de contenido de árido reciclado, es decir, el mortero MR75 s/c.

La *tabla 30* nos muestra los valores obtenidos de la densidad en seco y porosidad en los morteros con cal:

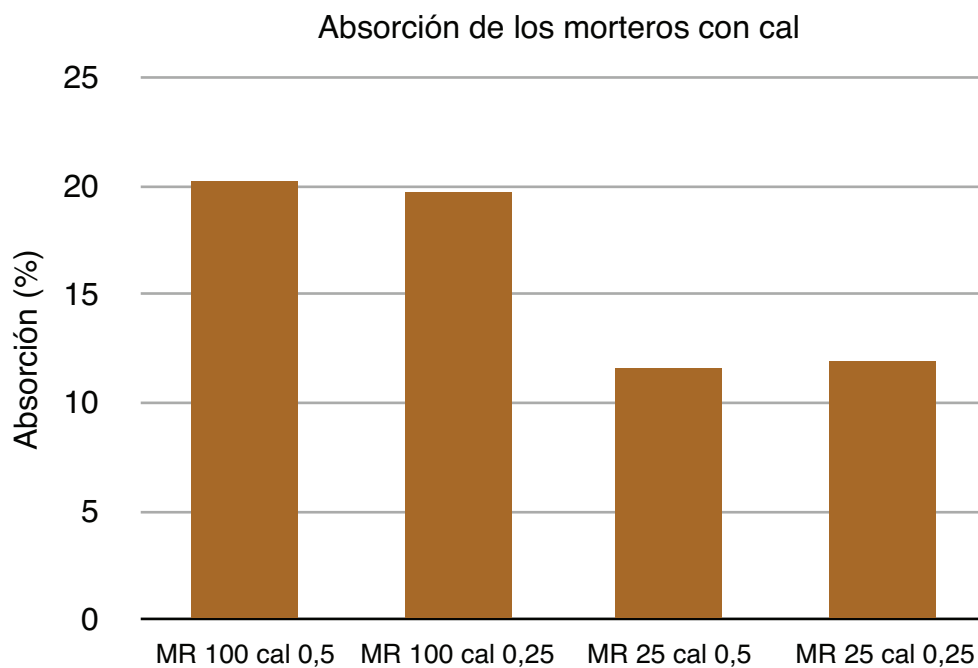
Muestra	M sss	M s	P sumergido	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad sss (kg/m <sup>3</sup> )	Absorción (%)	Porosidad
MR100 cal 0,5	198,3	165	96,3	1618	1944	20,2	32,6
MR100 cal 0,25	201,7	168,5	96,7	1605	1921	19,7	31,6
MR25 cal 0,5	224,6	201,2	120,3	1929	2153	11,6	22,4
MR25 cal 0,25	209,3	187	113,1	1944	2176	11,9	23,2

**Tabla 30:** Densidad en seco y porosidad de los morteros sin cal

En el caso de los morteros con cal, se puede observar que aquellos morteros que tienen un contenido del 100% de árido reciclado como es el caso de los morteros MR100 cal 0,5 y MR100 cal 0,25, presentan menor densidad en seco que aquellos que tienen solo una sustitución del 25%.

Tomando en cuenta los valores obtenidos de la densidad en estado saturado con superficie seca, se puede ver que los morteros con mayor cantidad de cal y con mismo contenido de árido reciclado, presentan valores mayores.

Analizando los resultados de absorción, la *gráfica 18* nos muestra la relación de absorción que hay de los morteros con cal:



**Gráfica 18:** absorción de los morteros con cal

En esta gráfica se puede observar que la absorción que presentan los morteros con cal es mayor en aquellos morteros cuyo contenido de árido reciclado es mayor, sin embargo en aquellos morteros cuyo contenido de árido es igual pero el porcentaje de cal y cemento diferente, se puede observar que presentan absorciones similares.

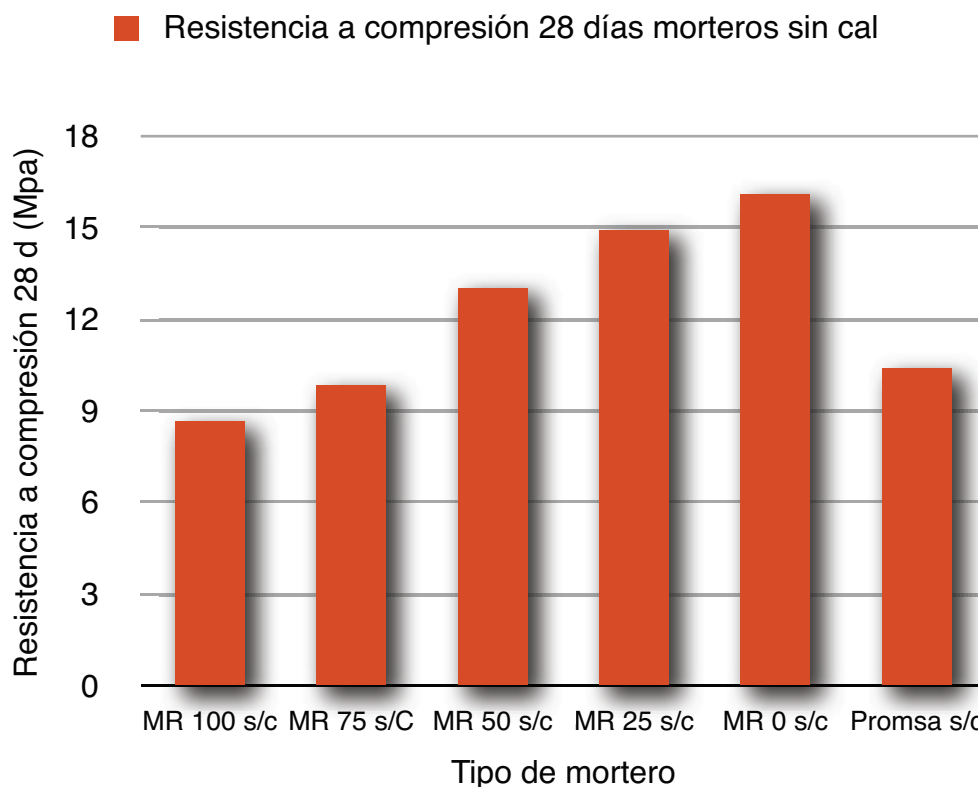
#### 5.2.3.1 Resistencia mecánica

La *tabla 31* nos muestra los resultados de las resistencias a flexión y compresión a 7 y 28 días de los morteros sin cal:

Tipo de mortero	Compresión 7 (MPa)	Flexión 7 (Mpa)	Compresión 28 (Mpa)	Flexión 28 (Mpa)
MR100 s/c	7,13	2,41	8,66	3,08
MR75 s/c	9,08	3,23	9,84	3,10
MR50 s/c	11,35	3,83	13,04	3,89
MR25 s/c	12,74	4,39	14,93	4,64
MR0 s/c	14,73	4,17	16,11	4,83
Promsa s/c	8,04	2,78	10,40	3,96

**Tabla 31:** Resistencia mecánica de los morteros sin cal

Debido a que es la resistencia a compresión a 28 días la mas importante a considerar en un mortero, será esta la que se analizara, la *gráfica 19* nos muestra los resultados:



**Gráfica 19:** Resistencia a compresión a 28 días de los morteros sin cal

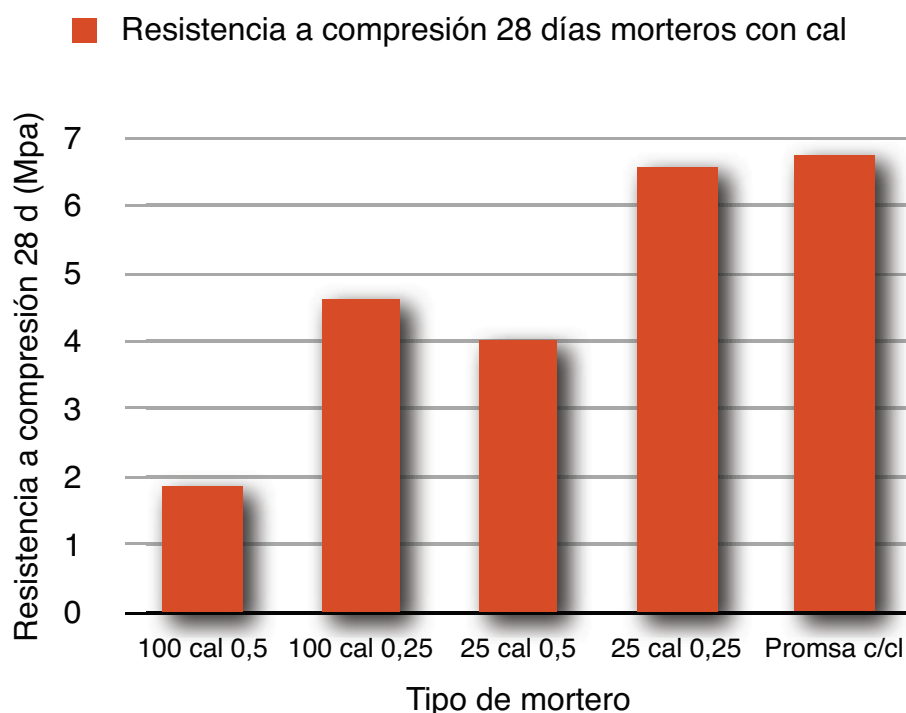
En esta gráfica se puede observar claramente que a mayor cantidad de árido fino reciclado, menor es la resistencia a compresión a 28 días del mortero, esto es debido a varios factores, el principal es el contenido de mortero adherido a la superficie del árido, este hace que el mortero sea mas ligero, mas poroso lo cual afecta a la resistencia del material.

Una vez analizada la resistencia mecánica de los morteros sin cal, se procede a analizar los resultados obtenidos de los morteros con cal, estos datos se muestran en la *tabla 32*:

Tipo de mortero	Compresión 7 (MPa)	Flexión 7 (Mpa)	Compresión 28 (Mpa)	Flexión 28 (Mpa)
MR100 cal 0,5	1,61	0,63	1,87	0,95
MR100 cal 0,25	4,16	1,43	4,63	2,34
MR25 cal 0,5	3,25	1,08	4,02	1,31
MR25 cal 0,25	2,99	1,01	6,57	2,60
Mortero Promsa con cal	4,08	1,70	6,74	2,83

**Tabla 32:** Resistencia mecánica de los morteros con cal

Para analizar la resistencia a compresión de los morteros con cal, se representan estos datos en la gráfica 20:



**Gráfica 20:** Resistencia a compresión 28 días de los morteros con cal

La incorporación de cal en el mortero disminuye la resistencia del mortero, pero lo dota de trabajabilidad, al contrario que el cemento que lo hace mas resistente, pero un exceso de este origina una mayor rigidez a la mezcla, lo que en el caso de que la fábrica quede sometida a pequeños movimientos podría fisurarse por su falta de flexibilidad.

## 6. CONCLUSIONES

### A- PROPIEDADES FÍSICAS DEL ÁRIDO FINO RECICLADO.

#### 1- GRANULOMETRIA.

La distribución granulométrica obtenida del árido fino reciclado es muy similar a la de la arena caliza convencional, siendo tan sólo una ligera diferencia en el contenido de filler que es mayor en el árido convencional. Esto muestra que no hay diferencias significativas y que a su vez la menor proporción de filler en el árido fino de reciclado es un aspecto positivo teniendo en cuenta que normalmente la demanda de agua en el hormigón con árido reciclado es mucho mayor que con el árido convencional.

#### 2- DENSIDAD Y ABSORCIÓN

Los resultados obtenidos de densidad y absorción en el árido fino reciclado son los esperados, es un árido más ligero y con una alta capacidad a la absorción, 9,1%. Por ello en la fabricación del hormigón el árido es conveniente que este en estado saturado con superficie seca y evitar el consumo de agua de mezclado.

La densidad de los mismos muestra un material más ligero debido a la pasta de mortero adherido y a la calidad del hormigón del cual proceden.

### B- CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERAL DEL ÁRIDO FINO RECICLADO

En el análisis de Fluorescencia de rayos X muestra pocas diferencias del árido fino reciclado del árido convencional, sólo se muestra una mayor proporción de los elementos sílice, aluminio e hierro, los cuales también son presentes en la pasta de cemento adherido al árido reciclado.

En el análisis de la difracción de rayos X el árido fino reciclado presenta además de calcita, hidróxido de calcio o portlandita e indicios de yeso, ambos minerales son fases presentes en la pasta de cemento del hormigón.

### C- MORTEROS

#### 1- GRANULOMETRIA Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERAL

En esta fase del estudio se ha querido hacer un mortero de albañearía tomando como punto de referencia dos tipos de morteros comerciales de la casa PROMSA.

Un mortero sin adición de cal y otro con adición de cal. De estos morteros se han analizado su granulometría y su composición química y mineral.

Podemos concluir que el mortero comercial sin cal tiene una mayor proporción de filler que el mortero comercial con cal, un 4% más, hecho que lo corrobora su análisis químico y mineral. En la fracción filler de ambos morteros se concentra a parte de la fracción filler de la arena, el cemento y la adición de cal en el caso que se haya añadido al producto este último.

El filler de ambos morteros se encuentra calcita, larnita o silicato bicálcico (anhidro del cemento), dolomita y cuarzo.

También podemos afirmar que en los dos morteros el árido convencional es de la naturaleza caliza.

## ***2- DOSIFICACIÓN DE LOS MORTEROS***

La cantidad de agua en el amasado de los morteros fue la misma, obteniéndose consistencias similares, esto fue debido a que los áridos fueron preparados en estado de saturados con superficie seca antes de incorporarlos en la fabricación de las mezclas, es decir, que se les agrego el agua de su correspondiente absorción, siendo 9,1% para los áridos reciclados y 0,65% para el convencional.

## ***3- MORTEROS EN ESTADO FRESCO***

Las propiedades en estado fresco estudiadas han sido la consistencia, la densidad aparente, el contenido de aire y la capacidad de retención de agua.

### ***a) Consistencia***

Para un mortero de albañería tiene que presentar una plasticidad adecuada para su colocación, por consiguiente el escurrimiento debe estar entre 140 y 200 mm. Podemos concluir que con las dosificaciones diseñadas en todos los distintos morteros según la proporción de árido fino reciclado se obtiene una plasticidad correcta con un valor de escurrimiento dentro del límite establecido por la norma UNE-EN 1015-3 para este uso. También se observa que en todas las dosificaciones los valores de escurrimiento obtenidos son muy similares tanto en los morteros sin cal como con cal poniendo de manifiesto que el árido fino reciclado no influye significativamente en esta propiedad cuando estos están en la condición de saturados con superficie seca. No obstante, los morteros con cal presentan un mayor escurrimiento que los morteros sin cal, debido por un lado al tamaño de grano o finura de la misma cal, que facilita el movimiento entre las partículas y por otro a la menor proporción de cemento en el mortero.



### ***b) Densidad aparente***

En esta propiedad se observa que los morteros en estado fresco presentan una menor densidad aparente cuanto mayor es la proporción de árido fino reciclado, debido a que parte de estos áridos tienen adherido mortero en su superficie haciendo el mortero más ligero.

De los morteros dosificados sin cal el que se asemeja más al mortero comercial de Promsa es el mortero con un contenido de 25% de árido reciclado MR25 s/c, y en el caso de los morteros con cal también se asemeja su valor de densidad aparente al comercial en el mortero con 25% de árido fino reciclado y 25% de cal en la mezcla de conglomerante, MR25 cal 0,25.

### ***c) Contenido de aire***

Los morteros con mayor proporción o sustitución por árido fino reciclado comportan morteros con un mayor contenido de aire. Esta característica influirá notoriamente en el mortero endurecido en su respuesta a la resistencia mecánica a compresión. Por otro lado este mayor contenido de aire favorece en el mortero fresco su trabajabilidad.

En cambio los resultados del contenido de aire en los morteros con cal y con una menor sustitución por el árido fino reciclado (25%) indican otra tendencia debido a la adición de dicha cal. Se observa que con menos proporción de cal en la fracción conglomerante y con la misma sustitución por árido fino reciclado el contenido de aire en el mortero fresco es menor.

Podemos constatar que en los morteros con cal (0,25 y 0,5) con alta sustitución de árido fino reciclado 100% (MR100 cal 0,5 y MR100 cal 0,25) tienen la misma alta proporción de contenido de aire, siendo la sustitución de árido y no la proporción de cal quien condiciona el contenido de aire. En cambio en los morteros con mucha menor sustitución de árido convencional por reciclado no influyen tanto como la adición de cal en la fracción conglomerante, siendo la proporción de cal que induce a un mayor o menor contenido de aire.

En el mortero comercial PROMSA con adición de cal presenta también mayor contenido de aire (11,5%) que el mortero de PROMSA sin cal (7%).

### ***d) Capacidad de retención de agua***

Es una de las propiedades más importantes que influyen tanto en el mortero en estado fresco como endurecido. Una buena retención de agua favorece la plasticidad en estado fresco para posteriormente garantizar un buen curado. En los morteros ensayados se observa que esta propiedad aumenta con el contenido de árido fino reciclado.

A si pues, el contenido de árido fino reciclado mejora la retención de agua del mortero.

#### 4- MORTEROS EN ESTADO ENDURECIDO

Las propiedades estudiadas han sido densidad en seco, porosidad, absorción de agua y resistencia mecánica.

##### **a) Densidad en seco y porosidad**

En los morteros con cal y sin cal la densidad decrece con la mayor sustitución de árido fino reciclado y por consiguiente los resultados de porosidad también muestran que esta crece con la dosificación de árido fino reciclado.

Y por otro lado, en los morteros con cal la densidad aumenta con mayor cantidad de cal y con el mismo contenido de árido fino reciclado.

##### **b) Absorción de agua**

En esta propiedad también observamos que a una mayor dosificación de árido fino reciclado mayor es la absorción de agua del mortero.

En los morteros que además se les ha adicionado cal en la fracción conglomerante substituyendo parcialmente el contenido de cemento dicha substitución no modifica el valor de la absorción siendo el árido fino reciclado quien influye directamente en esta propiedad.

Uno de los problemas que presenta el uso de árido reciclado es su alta capacidad de absorción siendo necesario saturar dichos áridos y en el momento del mezclado usar áridos saturados con la superficie seca.

##### **c) Resistencia mecánica**

Los valores de resistencia muestran que esta es menor a mayor contenido de árido fino reciclado en los morteros.

En el caso de los morteros sin cal ensayados el que se asemeja más al mortero de PROMSA comercial sin cal es el mortero con referencia MR75 s/c (con un 75% de árido fino reciclado).

En cambio en los morteros con cal el MR25 cal 0,25 (25% de árido fino reciclado) es el que se asemeja más al mortero PROMSA comercial con cal.

La cal da plasticidad pero su adición por substitución de cemento en la fracción conglomerante hace disminuir el valor de la resistencia a compresión. Pero hemos de tener claro que un exceso de cemento en estos tipos de morteros originan rigidez nada recomendable para su aplicación en la albañería.

## 7. TRABAJO A FUTURO

Este trabajo ha estudiado las propiedades físicas y mecánicas que presentan los morteros de albañilería fabricados con árido reciclado, a continuación se mencionan algunas líneas de investigación que pueden se realizar para complementar esta investigación:

1. En los morteros sin cal, debido a la alta resistencia a compresión que presentan estos con respecto al mortero comercial, se pueden fabricar morteros reciclados sin cal con un contenido de cemento menor.
2. Analizar las propiedades químicas que presentan los morteros de albañilería fabricados con áridos reciclados provenientes de hormigón.
3. Estudiar la influencia que tiene la incorporación del árido reciclado en la adherencia de los morteros.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- (1) MIREN ETXEBERRIA., Grupo de trabajo "Hormigón Reciclado". *Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*, 2003.
- (2) SANCHEZ DE JUAN, M.; "Estudio sobre la utilización de árido reciclado en hormigón estructural". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2005.
- (3) COMISION 2 GRUPO DE TRABAJO 2/5,H. (Septiembre 2006), *Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*. Madrid: Asociación científico-técnica del hormigón estructural (ACHE).
- (4) RILEM (international Union testing and research laboratories for Materials and structure). En *Specifications for concrete with recycled aggregates*. 1994
- (5) Isabel martins: 1<sup>st</sup> draft : use of the fine fraction
- (6) MARMASH. B.E.: "The properties of recycled precast concrete hollow core slabs for use as replacement agregate in concrete" *Waste materials in construction*. Edited by G.R. Wolley; J.J.J.M. Goumans;P.J. Wainwright, p.p.769-781, 2000.
- (7) BARRA, M. *Estudio sobre la utilización del árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural*. Barcelona, España: Tesis Doctoral. Universidad Politecnica de Cataluña. 1996.
- (8) EHE-08. *Instrucción de hormigón estructural*. Madrid, España: Ministerio de fomento. 2008
- (9) GONZALEZ, B. *Hormigon con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante*. A Coruña, España: Tesis doctoral. E.T.S.I. Caminos, canales y puertos, Universidad Politecnica de Coruña. 2002
- (10) Hong Kong. *Specification facilitating the use of recycled aggregates..* Hong Kong: Works Burei Technical circular. 2002
- (11) ALEJANDRE SANZHEZ. *Historia, caracterización y restauración de morteros*. Universidad de Sevilla. 2002
- (12) VENUAT MICHEL. *Aditivos y tratamientos de morteros y hormigones*. Margarit Adrian. Barcelona, España. 1972
- (13) RODRIGUEZ-MORA OSCAR. *Morteros guía general*. AFAM. Madrid. 2003
- (14) VARELA BLANCO TERESA. *Estudios avanzados sobre cementos, morteros y hormigones*. Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Madrid. 2007
- (15) MIRANDA,L. *Construction and demolition waste variability and its influence on mansory and plastering mortars properties*. Brazil. 2002
- (16) Vegas I. *Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón*. Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Madrid, España. 2007
- (17) J.L. PARRA. *Aridos reciclados para hormigones y morteros*. Universidad Politecnica de Madrid. Madrid, España. 2006

- (18) HENAO, HINCAPIE, LOPEZ AGUJA. *Agregado fino para morteros*. Universidad Eafit, Medellín, Colombia. 2003
- (19) EQAR. *Recycling of building materials*. Alemania 2006
- (20) UNE-EN 1015-1. *Determinación de la granulometría*
- (21) UNE-EN 1015-2. *Toma de muestras total de morteros y preparación de los morteros para ensayo*
- (22) UNE-EN 1015-3. *Determinación de la consistencia del mortero fresco*
- (23) UNE-EN 1015-6. *Determinación de la densidad aparente del mortero fresco*
- (24) UNE-EN 1015-7. *Determinación del contenido de aire en el mortero fresco*
- (25) UNE-EN 1015-10. *Determinación de la densidad aparente del mortero endurecido*
- (26) UNE-EN 1015-11. *Determinación de la resistencia a flexión y compresión de los morteros endurecidos*
- (27) UNE-EN 998-1. *Especificaciones de los morteros de albañilería. Parte 1: Morteros para revoco*
- (28) UNE-EN 998-2. *Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería*
- (29) UNE-EN 83-816-93. *Determinación de la retención de agua*